

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PAULO JULIANO BURIN

ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS EM ÁREAS
URBANAS CONGESTIONADAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção, na Área de concentração de Logística e Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Galvão Naclério Novaes

Co-orientador: Prof. Dr. Edson Tadeu Bez

Florianópolis - SC
2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

B958r

Burin, Paulo Juliano

Roteirização dinâmica de veículos em áreas urbanas congestionadas [dissertação] / Paulo Juliano Burin ; orientador, Antônio Naclério Galvão Novaes. - Florianópolis, SC, 2011.

124 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Inclui referências

1. Engenharia de produção. 2. Logística. 3. Veículos.
4. Heurística. I.Novaes, Antonio Galvão Naclério.
- II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

CDU 658.5

Paulo Juliano Burin

ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS EM ÁREAS URBANAS CONGESTIONADAS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Produção”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, 30 de Agosto de 2011.

Prof. Antonio Cezar Bornia, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Antônio Galvão Novaes, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Edson Tadeu Bez, Dr.
Universidade do Vale do Itajaí

Profª. Mirian Buss Gonçalves, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Sergio Coelho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esta dissertação aos meus pais e minha esposa. Meus pais Danilo e Cledi por ter dedicado suas vidas em prol de seus filhos, e ter proporcionado a maior herança que uma pessoa pode receber, a educação. A minha esposa Gabriela, por todo o incentivo, paciência, bom senso e dedicação que teve durante todo este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A DEUS que todos os dias me propicia lutar para conseguir o que desejo, por dar-me força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e por ser meu refúgio quando necessitei.

A meus pais Danilo e Cledí, vocês são exemplos verdadeiros de pai e mãe, como filho sinto diariamente todo o amor que vocês me dedicam, em minhas atitudes sempre está a intenção de orgulhá-los. Agradeço especialmente pela oportunidade de estudar, pois entre tantos sacrifícios e dificuldades vocês foram incansáveis para que eu pudesse alcançar meu objetivo.

Ao meu amor Gabi, você é “the best”. Agradeço por todo seu carinho, companheirismo, pela paciência e pelo amor. Além disso, por entender a importância desse trabalho e por me ajudar no que era possível.

A meus irmãos Daniele e Vergílio, vocês são pessoas muito especiais na minha vida, meu orgulho por vocês é imenso, e me faz acreditar que as dificuldades são para serem superadas, e que o sucesso na vida depende de cada um.

A minha Nana, que nos momentos difíceis me acolheu para que hoje eu vivenciasse esse momento.

Ao meu orientador professor Novaes, que deixou meu mundo ainda maior e me fez entender que cada vez que aprendemos alguma coisa, existem tantas outras para aprendermos.

A meu grande amigo e coorientador Edson, você foi primoroso, mostrando os caminhos, sendo grande parceiro nessa jornada, me ensinando tantas coisas fundamentais para meu crescimento, chamando minha atenção quando tinha que chamar, contribuindo com suas discussões e fundamentalmente me dando entusiasmo para continuar.

A meus professores, que dedicaram seu tempo passando seus conhecimentos que foram de suma importância no decorrer do processo.

Aos meus amigos e colegas, agradeço todo o carinho que recebi todo o apoio e incentivo.

A empresa VH Soluções em TI, pelo apoio e compreensão.

“A vida não dá e nem empresta, não se comove e nem se apieda. Tudo quanto ela faz é retribuir e transferir aquilo que nós lhe oferecemos.”

Albert Einstein

RESUMO

Problemas dinâmicos de roteirização de veículos têm recebido crescente atenção dos pesquisadores, em função da rápida evolução das tecnologias de telecomunicação, do tratamento da informação e dos avanços observados nas técnicas de análise, otimização e computação.

Nos centros urbanos sujeitos a congestionamentos de tráfego elevados e imprevisíveis, os operadores logísticos costumam alocar, muitas vezes, um número excessivo de tarefas aos seus veículos, acarretando o não cumprimento de atividades programadas ao fim da jornada diária, situação essa que leva ao não cumprimento dos compromissos logísticos assumidos com seus clientes. No presente estudo é apresentado um método de roteirização dinâmica em que parte das tarefas em excesso, que venham a ocorrer nos roteiros programados, é transferida para um veículo auxiliar, que efetua, assim, um roteiro dinâmico constituído pelas atividades provenientes dos veículos regulares.

Para validar o modelo proposto foi utilizada simulação na definição dos parâmetros mais relevantes e foram comparados resultados obtidos entre um procedimento de roteirização estática com o procedimento de roteirização dinâmica proposto. Os resultados obtidos apresentaram um aumento considerável do nível de serviço com a adoção do modelo proposto.

Palavras-chave: Logística dinâmica. Problema de roteirização de veículos. Heurísticas.

ABSTRACT

Dynamic vehicle routing problems have received growing attention from researchers as a result of the rapid evolution of information and telecommunication technologies, as well as the advancements in the analysis, optimization and computation techniques.

In large urban centers subject to severe and unpredictable traffic congestions, logistics operators frequently tend to allocate an excessive number of tasks to their vehicles, leading to the non-accomplishment of part of the programmed activities at the end of the daily working periods, a situation resulting into faulty performance standards, and eventually breaking previously assumed service levels with their clients. It is presented in this study a dynamic vehicle routing method in which at least part of the tasks in excess, that may occur in the previously planned route, are transferred to one auxiliary vehicle. This vehicle executes then a dynamic routing formed with the tasks transferred from the regular vehicles.

In order to validate the proposed model, a simulation process was used to define the most relevant parameters. Additionally, the results obtained with the dynamic routing model were compared with the classical static routing problem figures. The results obtained with the proposed dynamic model showed a substantial service level improvement.

Key-words: Dynamic logistics. Vehicle routing problem. Heuristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Hamiltoniano	42
Figura 2 – Grafo do Caixeiro Viajante.....	44
Figura 3 - Múltiplos Caixeiros Viajantes	47
Figura 4- Ilustração da troca do 2-opt	61
Figura 5 - Duas possibilidade de movimento do 3-opt.....	62
Figura 6 - Estrutura básica do Algoritmo Genético.....	66
Figura 7 - Roteiro de um veículo regular em determinado distrito	68
Figura 8- Região de representação do cenário adotado.....	68
Figura 9- A rota sequencial do veículo e a estratégia de decisão	76
Figura 10- Representação da funcionalidade da Análise Sequencial ...	78
Figura 11- Rota auxiliar (cromossomo)	81
Figura 12- Dupla de pais para o algoritmo genético	82
Figura 13- Dupla de filhos gerados pelo algoritmo genético	82
Figura 14- Geração do cromossomo	83
Figura 15- Tela do sistema de simulação	85
Figura 16- Tela do sistema de simulação II	85
Figura 17-Ilustração da subdivisão do sistema de simulação.....	86
Figura 18 - Algoritmo referente ao módulo dinâmico.....	95
Figura 19 - Caminhão VW 17.220 Worker	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Vizinho Mais Próximo	57
Quadro 2- Inserção do Mais Próximo	58
Quadro 3 - Inserção mais Barata	58
Quadro 4- Economias de Clark e Wright	59
Quadro 5- Inserção mais Distante	60
Quadro 6 - Algoritmo Genético	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Amostragem dos cálculos exatos para PCV	44
Tabela 2- Matriz de distância do grafo.....	45
Tabela 3 - Caracterização do problema de roteirização	50
Tabela 4 - Simulação da configuração estática	90
Tabela 5- Tarefas transferidas para veículo auxiliar	94
Tabela 6 - Número de simulações executadas.....	96
Tabela 7 - Variáveis de entrada do sistema de simulação	97
Tabela 8- Resultados da simulação, configuração estática.....	99
Tabela 9- Resultados da simulação, configuração dinâmica não utilizando centro de massa.	100
Tabela 10- Resultados da simulação, configuração dinâmica utilizando centro de massa.	101
Tabela 11 - Quantidade de tarefas não cumpridas pelo veículo auxiliar	103
Tabela 12- Resultado do modelo estático, agrupado por número de clientes da faixa A	104
Tabela 13- Resultado do modelo dinâmico sem utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes da faixa A	105
Tabela 14 - Resultado do modelo dinâmico com utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes da faixa A	106
Tabela 15- Resultado do modelo dinâmico sem utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes e por faixa.....	107
Tabela 16- Resultado do modelo dinâmico com utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes e por faixa.....	108
Tabela 17- Resultado do modelo estático, agrupado por número de clientes e por faixa.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	- Colônia de Formigas
AG	- Algoritmo Genético
AS	- Recozimento Simulado
CARP	- Problema de Roteirização de Veículos com Demanda em Arcos
CD	- Centro de Distribuição
CPP	- Problema do Carteiro Chinês
CX	- Cicle Crossover
DARP	- Problema “Peça por uma carona”
DVRP	- Problemas Dinâmicos de Roteirização de Veículos
EDP	- Problema de Entrega Expressa
FSMVRP	- Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma frota de Veículos Heterogênea
FSVRP	- Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma frota Homogênea de Veículos
GPDP	- Problema Geral de Coleta e Entrega
HFFVRP	- Problema de Roteirização de uma frota Heterogênea Fixa
MDVRP	- Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos
MTSP	- Problemas de Múltiplos Caixeiros Viajantes
OX	- Order Crossover
PMX	- Partially Matched Crossover
PRPVJT	- Problema de roteirização com programação de veículos
PRV	- Problema de Roteirização de Veículos
PRVD	- Problema de Roteamento de veículos dinâmico
PVRP	- Problema de Roteirização de Veículo Multi-Período ou Periódico
SPRT	- Teste de Probabilidade Sequencial
SVRP	- Problema de Roteirização de Veículos com Demanda Estocástica
TDVRP	- Problema de Roteirização de Veículo com Tempo Dependente
TS	- Busca Tabu
TSP	- Problema do Caixeiro Viajante
TSPB	- Problema do Caixeiro Viajante com Coleta de Retorno
VRP	- Problema de Roteirização de Veículos

- VRPPD - Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega
- VRPSD - Problema de Roteirização de Veículos com Entregas Fracionadas
- VRSPST - Problema de Roteirização (e Programação) de Veículos com Janelas de Tempo Flexível
- W
- VRSPTW - Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	25
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
1.2.	OBJETIVOS	27
1.2.1.	Objetivo Geral.....	27
1.2.2.	Objetivos Específicos	27
1.3.	MOTIVAÇÃO	27
1.4.	METODOLOGIA	28
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
2.	PROBLEMAS DE COLETA E DISTRIBUIÇÃO	31
2.1.	INTRODUÇÃO	31
2.2.	DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE PRODUTOS.....	31
2.3.	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	32
2.4.	TRANSPORTE.....	33
2.4.1.	Transporte rodoviário	34
2.5.	ZONEAMENTO.....	34
2.6.	PROBLEMAS DE COLETA E/OU ENTREGA	35
2.6.1.	Roteiros com Coletas e Entregas	36
2.6.2.	Roteiros apenas com coletas ou entregas	38
3.	PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO	41
3.1.	INTRODUÇÃO	41
3.2.	PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE	41
3.2.1.	Problemática.....	43
3.2.2.	Formulação.....	45
3.2.3.	Aplicabilidade.....	46
3.3.	PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS VIAJANTES	47
3.4.	PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	48
3.4.1.	Classificação do Problema de Roteirização de Veículos	49
3.4.2.	Problemas Clássicos de Roteirização de Veículos	53
4.	MÉTODOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS.....	55
4.1.	INTRODUÇÃO	55
4.2.	MÉTODOS DE RESOLUÇÃO	55
4.3.	MÉTODOS EXATOS	56
4.4.	MÉTODOS HEURÍSTICOS	56
4.4.1.	Heurísticas Construtivas	57
4.4.2.	Heurísticas de Melhoramento	60
4.4.2.1.	Método 2-opt	61
4.4.2.2.	Método 3-opt	62
4.5.	METAHEURÍSTICAS	63
4.5.1.	Algoritmo Genético.....	64
5.	MODELO PROPOSTO	67
5.1.	INTRODUÇÃO	67

5.2.	O PROBLEMA E A PROPOSTA	67
5.2.1.	Equalização de esforços entre distritos e tempo de ciclo	69
5.2.2.	PCV Estático	72
5.2.3.	PCV dinâmico	73
5.2.4.	Análise Sequencial	76
5.2.5.	Modelagem do AG para o veículo auxiliar	80
5.3.	PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO	83
5.3.1.	Módulo Geral	87
5.3.2.	Módulo estático	88
5.3.3.	Módulo Dinâmico.....	91
5.3.4.	Valores de entrada	96
5.4.	RESULTADOS	97
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	
	PARA TRABALHOS FUTUROS	112
6.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
6.2.	TRABALHOS FUTUROS	113
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	114

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a globalização, as empresas procuram novos referenciais para sua atuação, necessitando terem seus produtos a preços competitivos, exigidos pelo mercado; fazendo com que procurem a redução do custo total das mercadorias.

Ballou (2007), afirma que para a maioria das empresas, o transporte é o elemento que representa maior destaque nos custos logísticos, podendo absorver de um a dois terços de sua representação. A partir desta visão, é de fundamental importância que para participar de um mercado cada vez mais competitivo, as empresas devam possuir um sistema de transporte mais eficiente, garantindo a qualidade dos serviços e com custos cada vez mais baixos.

De tal modo, a comunidade científica das áreas de logística e transporte vem dando cada vez mais atenção para os Problemas de Roteirização de Veículos (Vehicle Routing Problems – VRP) (GOLDEN, RAGHAVAN e WASIL, 2008; RIBEIRO e LORENA, 2005; CRAINIC e LAPORTE, 1998). Neste sentido, os problemas do tipo VRP vêm sendo utilizados na construção de rotas, visando a utilização eficiente dos veículos na execução de tarefas relacionadas a coletas e entrega de mercadorias, serviços de manutenção, serviços de emergência entre outros. Em condições normais as tarefas são previamente definidas e organizadas de maneira a contemplar as entregas respeitando um determinado limite de tempo e a capacidade de carga do veículo. Sendo assim, esse tipo de problema é considerado estático, o qual se caracteriza por possuir todas as suas variáveis explicitamente conhecidas antes que o veículo inicie sua rota. (NOVAES e BURIN, 2009)

A busca de uma solução adequada passa, por exemplo, pela minimização das distâncias ou do tempo de percurso na rota, utilizam-se heurísticas apropriadas para cada tipo de problema, as quais mesmo não encontrando uma solução exata, tendem a encontrar resultados satisfatórios.

Nas grandes metrópoles, é comum que aconteçam variabilidades de tempo durante o processo de distribuição, devido ao grande número de variáveis aleatórias que podem ocorrer durante o percurso. Isso faz com que seja alocado um número maior de clientes às rotas, visando melhorar a utilização dos veículos. Em consequência disso, os veículos não conseguem efetuar o atendimento de todos os clientes alocados previamente, fazendo com que haja uma queda do nível de serviço logístico. (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

Com a necessidade em minimizar a perda do nível do serviço logístico, adota-se então uma solução com enfoque dinâmico para o problema estático. Contudo, os Problemas de Roteirização Dinâmicas de Veículos (DVRP - Dynamic Vehicle Routing Problems) também são foco de estudo da comunidade científica, por possuir grande aplicabilidade prática, buscando fazer uma alocação eficiente dos veículos na execução das tarefas determinadas (CRAINIC e LAPORTE, 1998; RIBEIRO e LORENA, 2005; GOLDEN, RAGHAVAN e WASIL, 2008; NOVAES e BURIN, 2009). Para que um problema se caracterize dinâmico, as informações referentes às condições do veículo durante o roteiro devem mudar de forma gradual, ou seja, ambiente real time. (LARSEN, 2001; LARSEN, SALOMON e MADSEN, 2007; GOEL, 2008)

Todavia, na busca de encontrar uma solução dinâmica, apresenta-se neste trabalho, um modelo no qual o problema é validado através de simulação. Este modelo é composto por um depósito central, uma frota homogênea e uma região urbana \mathcal{R} , onde clientes estão distribuídos de tal forma que obedecem a uma determinada proporcionalidade. Cada veículo é alocado em distrito, ou zona. Assim, os veículos deixam o depósito bem cedo pela manhã, deslocando-se até o distrito, percorrendo uma rota ótima obtida através de um *PCV* (Problema do Caixeiro Viajante), realizando os serviços em cada cliente, e retornando ao depósito quando todas as tarefas forem cumpridas, ou quando o tempo máximo de jornada de trabalho esgotar-se. Tarefas que porventura não puderem ser atendidas, serão transferidas a outro agente (veículo auxiliar) dentro de uma janela de tempo adequada, buscando evitar a ocorrência de tarefas não realizadas ao fim do ciclo diário e, portanto, melhorando o nível de serviço.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Apresentar uma alternativa dinâmica para um problema estático de coleta de produtos, em que se procura reduzir ao máximo o não cumprimento de tarefas planejadas ao fim do dia, ao mesmo tempo em que se procura melhorar o desempenho operacional da frota.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Pesquisar modelos utilizados para resolver problemas de roteirização de veículos;
- Propor um procedimento de roteirização dinâmica;
- Implementar um sistema computacional de simulação para definição dos parâmetros mais relevantes;
- Desenvolver um esquema integrado de roteirização, em que parte das tarefas alocadas a um veículo seja transferida para um veículo auxiliar, monitorado pelo depósito central;
- Analisar e avaliar os resultados obtidos, comparando com o problema de roteirização estático;

1.3. MOTIVAÇÃO

Durante estudos realizados na área de logística e transporte, constatou-se que nos processos de coleta de mercadorias com restrições de jornada de trabalho e capacidade do veículo, são adotadas soluções estáticas para resolver tal problema.

Sendo assim, em condições de congestionamento de tráfego, comuns em grandes cidades, esses elementos se alteram frequentemente, e os tempos de percurso na distribuição urbana apresentam grande variabilidade. Isso ocorre, devido às condições extremas de tráfego e ao grande número de variáveis aleatórias envolvidas ao longo da rota.

Decorrente desses fatores, os operadores logísticos acabam fazendo uma grande alocação de clientes dentro de determinados

roteiros, de forma a melhorar a utilização do veículo e de sua tripulação, buscando a redução dos custos logísticos. No entanto, tal prática leva à ocorrência de tarefas não executadas ao final do dia, reduzindo assim, os níveis de serviço.

Em decorrência dessa redução, as empresas que executam este tipo de trabalho começam a perder competitividade no mercado, em detrimento às multas que devem ser pagas pelo não cumprimento das tarefas. Além disso, existe uma relação de confiabilidade criada entre as empresas e seus clientes, a qual é afetada influenciando na satisfação desses clientes.

Observando tais fatores, surgiu a motivação para realizar um estudo com intuito de minimizar esse tipo de problema, buscando assim criar um modelo alternativo, com o objetivo de melhorar a qualidade do nível de serviço.

1.4. METODOLOGIA

Dentro do presente estudo realizaram-se pesquisas bibliográficas, construção de um modelo teórico e um sistema de simulação.

Para alcançar os objetivos propostos, pesquisaram-se os problemas de distribuição envolvendo coleta, entrega, além da coleta e entrega simultâneas. Posteriormente, sobre o Problema do Caixeiro Viajante, Problemas de Roteirização de Veículos, e suas derivações, além do enfoque estático e dinâmico dado a essa classe de problema.

Para obtenção dos resultados necessários, foram estudados os métodos exatos e heurísticos, dentre os quais se optou pela utilização do método construtivo chamado de Inserção do Mais Distante, o de melhoramento chamado 3-opt e a metaheurística do Algoritmo Genético.

Enfim, o modelo foi definido, desenvolvido e aplicado, consequentemente, obtendo-se resultados gerados por um sistema de simulação, os quais foram apresentados e analisados.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se em sete capítulos, sendo o primeiro as considerações iniciais do trabalho, além dos objetivos (gerais e específicos), bem como a motivação e metodologia empregada no trabalho.

No segundo capítulo apresentam-se estudos referentes à Distribuição Física de Produtos, Sistemas de Distribuição, Transporte, focando no Modal Rodoviário, Zoneamento de áreas e Problemas de Coleta e/ou Entrega.

No terceiro, discorre-se sobre os Problemas de Roteirização, fazendo uma revisão sobre o Problema do Carteiro Viajante, Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes e Problemas de Roteirização de Veículos.

No quarto capítulo, abordam-se os Métodos utilizados para solucionar os problemas de roteirização de veículos, os quais foram divididos neste trabalho em Métodos Exatos, Heurísticos e Metaheurísticas.

No quinto capítulo, apresenta-se o modelo proposto neste trabalho, onde primeiramente demonstra-se o problema e a proposta, seguindo dos procedimentos de simulação e resultados.

No sexto capítulo são expostas as conclusões além de sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, as referências são relacionadas para identificar as citações no texto.

2. PROBLEMAS DE COLETA E DISTRIBUIÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo as atividades logísticas nas empresas foram confundidas com transporte e armazenagem de mercadorias. Todavia, com a evolução do sistema produtivo e do comércio, este elemento de forma isolada, começou a não satisfazer mais as necessidades das empresas e consumidores. No entanto, a logística evoluiu e começou a agregar valor de lugar, de tempo, de qualidade e de informação. (NOVAES, 2004)

Assim, o ramo da logística que trata da movimentação e armazenagem de mercadorias é a distribuição física, que com as exigências do mercado, passou a ter um papel importante nos problemas logísticos da empresa, buscando níveis de serviços mais elevados, diminuição de custos financeiros, transporte e distribuição de mercadorias.

Neste sentido, o presente capítulo abordará a Distribuição Física de Produtos, Sistemas de Distribuição, Transporte, focando no modal Rodoviário, Zoneamento e Problemas de Coleta e/ou Entrega.

2.2. DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE PRODUTOS

Segundo Novaes (2004), a distribuição física objetiva, levar os produtos certos, para os lugares certos, no momento certo e, com níveis de serviços considerados satisfatórios, minimizando os custos.

Assim, a distribuição física caracteriza-se como uma das principais atividades das empresas, pois consegue definir o sucesso no processo de atendimento aos clientes (BOTELHO, 2003). Para Bowersox e Closs (2001), é a distribuição que cria um vínculo entre a empresa e seus clientes.

Já sobre o gerenciamento dessa distribuição, Ballou (2007) e Novaes (2004), a dividem em três níveis: estratégico, tático e operacional. O nível estratégico, geralmente envolve um período maior de tempo para ser executado, pois consiste em decisões em nível de alta

direção, envolvendo a expansão da empresa, execução de novas formas de distribuição, introdução de novos produtos e serviços, entre outros.

Contudo, o nível tático envolve geralmente períodos de médio e curto prazo para ser executado, sendo estes realizados por gerentes da empresa, analisando e definindo a oferta para atender as variações sazonais da demanda, além da programação da contratação de pessoal extra para períodos de demanda de pico, bem como desenvolver outras atividades.

No nível operacional da distribuição de produtos, a função é de definir diariamente os roteiros de entrega, alocação dos veículos às rotas, etc. Nesse nível envolvem-se situações de forma a assegurar o deslocamento dos produtos para os canais de distribuição ou diretamente para os mercados consumidores, no tempo correto.

Segundo Galvão (2003), os problemas relacionados à roteirização e programação são tratados na fase operacional, quando a frota e as zonas de distribuição já estão definidas. Entretanto, para que a otimização dos roteiros apresentem resultados satisfatórios é necessário que o sistema tenha sido planejado e dimensionado nos níveis estratégicos e táticos.

2.3. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Para Novaes (2004), a distribuição física pode ser dividida em um número razoável de situações, podendo ser basicamente resumidas em duas configurações básicas: distribuição “um para um” e distribuição “um para muitos”.

Na situação “um para um”, o veículo é totalmente carregado no depósito e transporta a carga para outro ponto de destino, que pode ser um centro de distribuição, uma loja, um cliente ou qualquer outra instalação. (NOVAES, 2004)

Já na distribuição “um para muitos”, o veículo é carregado no centro de distribuição, percorre o caminho com distância d até a zona de entrega. Dentro desta, o veículo realiza n visitas a clientes, efetuando coletas ou entregas. Após o termino do serviço, o veículo volta ao depósito, percorrendo novamente a distância d . Nesse tipo de distribuição há influencia de 15 fatores, sendo estes: divisão da região a ser atendida em zonas de entrega, cada uma visitada por um

determinado veículo; distância d entre o depósito e a zona de entrega; velocidades operacionais médias; tempo de parada em todos os clientes; tempo de ciclo; frequência de visitas; quantidade de mercadorias; densidade da carga; dimensões e morfologia das unidades transportadas; valor unitário; acondicionamento; grau de fragilidade; grau de periculosidade; compatibilidade entre produtos de natureza diversa e custo global. (NOVAES, 2004)

Conforme o autor supracitado há uma correlação estreita entre as atividades que constituem o sistema de distribuição física de produtos e os canais de distribuição.

Bowersox e Closs (2001) afirmam que o canal de distribuição é um meio através do qual um sistema de livre mercado realiza a transferência de posse de produtos e serviços. Entretanto, para Silva (1999) os canais de distribuição envolvem os responsáveis por levar o produto até o seu destino, buscando atender da melhor maneira possível.

2.4. TRANSPORTE

Para a maioria das empresas o transporte representa, a atividade logística de maior importância, podendo chegar a dois terços dos custos logísticos, ou seja, a melhoria no sistema de transporte pode contribuir para o aumento da competição no mercado, garantindo a economia de escala na produção e reduzindo o preços das mercadorias. (BALLOU, 2006)

Em decorrência disso, o transporte é considerado mais que um traslado de mercadorias, quando em execução, deve ser considerado de forma otimizada, em que os fatores tempo, custo e eficiência são indispensáveis, englobando todos os aspectos da operação de movimentação na distribuição física. (ENOMOTO, 2005)

No Brasil, o transporte é altamente relevante, sendo ele o principal responsável pelo escoamento das cargas no país, abrangendo desde safras agrícolas até entregas de simples de mercadorias. (VALENTE, PASSAGLIA e NOVAES, 2003)

Esta movimentação de cargas deve atender às necessidades dos clientes visando disponibilizar: velocidade no atendimento; confiabilidade no cumprimento das demandas existentes; e flexibilidade (BERTAGLIA, 2003). Entretanto, o fluxo dessas cargas pode ser realizado através de vários modais, dependendo do tipo, prazo de

entrega ou valor agregado. Dentre estes modais estão: o transporte ferroviário, transporte aquaviário, transporte aéreo, transporte dutoviário e o transporte rodoviário (NOVAES, 2004). Sendo que para este trabalho optou-se pela delimitação do transporte rodoviário.

2.4.1. Transporte rodoviário

O transporte rodoviário tem a capacidade de movimentar produtos de diversas dimensões e pesos, além de ter a flexibilidade de atender de curtas a longas distâncias, podendo realizar coletas e entregas ponto a ponto, por possuir veículos de tamanhos diferenciados, podendo atuar tanto em centros urbanos como também nas demais localidades (STENGER e DEIMLING, 2006). Para Bowersox, Cooper e Closs (2006) a grande peculiaridade deste tipo de transporte são suas operações de custo fixo baixo e um custo variável alto.

2.5. ZONEAMENTO

Em sistemas de coleta ou distribuição, em regiões relativamente grandes, existe um problema relacionado ao desequilíbrio entre os veículos que atendem zonas próximas ao depósito e os que atendem zonas mais distantes. (ENOMOTO, 2005)

Para solucionar esse problema de desequilíbrio, na coleta e ou distribuição, Novaes (2004) aborda uma metodologia que analisa este problema, sendo que: em um processo de coleta/distribuição em uma região \mathcal{R} , divide-se a região em n zonas, sendo que para cada uma dessas, é alocado um veículo para realizar a coleta/distribuição.

Para isso, dois princípios devem ser observados: a procura pelo menor custo operacional e a procura do menor tempo de operação (VALENTE, PASSAGLIA e NOVAES, 2003). Os autores afirmam que a partir destes princípios, alguns critérios podem ser estabelecidos:

- Compacidade: é a medida de proximidade de um grupo, sendo que quanto mais próximos forem os pontos do serviço menor o comprimento das rotas;
- Morfologia: os fatores que podem determinar a forma dos grupos são: As características das regiões urbanas, que já dividem a região em uma série de zonas, ou a finalidade dos transportes, como

para o caso do transporte escolar em que uma das hipóteses sugerida possui a forma elíptica.

- **Balanceamento:** Situação em que o número de pontos a serem servidos é dividido igualmente entre os diversos grupos e seus respectivos veículos, de acordo com sua capacidade e volume de serviço demandado nos pontos atendidos. O objetivo é conseguir um melhor aproveitamento dos veículos nas rotas.

- **Homogeneidade:** De acordo com as condições de tráfego, os volumes envolvidos, entre outros, as regiões podem ser mais ou menos homogêneas.

De modo geral, o problema de zoneamento envolve agrupar pontos baseados em proximidade ou medidas de similaridade, sendo que, o zoneamento das áreas de abastecimento visa equilibrar a demanda e a utilização dos recursos.

2.6. PROBLEMAS DE COLETA E/OU ENTREGA

O crescente índice populacional e a concentração da população nas grandes cidades vêm provocando o surgimento de um número cada vez maior dos pontos de atendimento. Paralelamente a isso, há um aumento significativo do número de veículos para atender essa demanda, contribuindo ainda mais para o agravamento de problemas de congestionamentos já existentes. Para tentar minimizar esse problema, as companhias de engenharia de tráfego têm inserido restrições nas operações de coleta e/ou entrega de mercadorias, dificultando ainda mais esse tipo de operação. (MELO e FILHO, 2001)

Contudo, as empresas de transporte buscam soluções eficientes nas tarefas de entrega e/ou coleta de mercadorias, com o objetivo de levar aos clientes maior confiabilidade nas operações logísticas. Para isso, é necessário otimizar vários itens no processo, como um melhor aproveitamento da frota disponível, utilizar de forma mais inteligente a tripulação dos veículos, fazer com que haja uma diminuição dos tempos de ciclo, entre outros. (MELO e FILHO, 2001)

Segundo Botelho (2003), a distribuição e/ou coleta de mercadorias é uma das principais atividades das empresas, pois define o sucesso no processo de atendimento aos seus clientes. Todavia, um bom

planejamento desta atividade pode criar condições para alcançar a eficiência e a confiabilidade no serviço prestado pela empresa, garantindo a satisfação dos clientes e a redução dos seus custos.

Neste sentido, o processo de coleta ou distribuição de mercadoria é realizado para atender uma demanda específica de todos os clientes, onde irá dispor de uma frota de veículos, que pode ser homogênea ou heterogênea. (LIMA, 2009)

Vários estudos vêm sendo realizados para tratar de problemas de coleta e/ou entrega de mercadorias, principalmente em situações reais, focando basicamente no que diz respeito à eficiência da frota de veículos para satisfazer a demanda das entregas e/ou coletas de determinado cliente. Nesse caso, cada cliente deve ser atendido por um único veículo. (XU, CHEN, *et al.*, 2003)

Várias restrições podem ser acrescentadas ao problema, como restrição no número de pontos de entrega em cada rota; restrição de tempo ou distância de uma rota; restrição de janelas de tempo; restrição de precedência entre cidades; tipo de frota; quantidade de veículos contidos na frota; capacidade dos veículos; quantidade de depósitos, etc. (LIMA, 2009). Problemas desse tipo, onde o objetivo é estabelecer e organizar roteiros ou itinerários são conhecidos como problemas de roteamento de veículos, os quais serão discutidos capítulo três.

Partes desses problemas estão ligadas diretamente ao tipo de operação, o qual é subdividido em: coleta, entrega, coleta e entrega simultâneas, e entrega(ou coleta) com cargas de retorno (BELFIORI, 2006; BODIN e GOLDEN, 1981). Isso significa que há problemas que envolvem tanto entregas quanto coletas de mercadorias em um mesmo roteiro, enquanto que para outros tipos de problemas apenas uma das operações é realizada no roteiro.

2.6.1. Roteiros com Coletas e Entregas

Os roteiros em que ambas as operações de coleta e entrega são utilizados, vêm sendo motivo de um grande número de estudos, que diversas variantes para este problema foram criadas. Devido a similaridade dessas variantes, estudos foram realizados, e definiu-se um tipo de problema denominado Problema Geral de Coleta e Entrega (GPDP, do inglês General Pickup and Delivery Problem) que combina

várias características encontradas entre esses problemas práticos de coleta e entrega.

Entretanto, no problema geral de coleta e entrega de mercadorias, um conjunto de rotas é construído de forma a atender as necessidades de transporte, contando com uma frota de veículos selecionada. O objetivo desse tipo de problema é fazer a minimização da frota de veículos, do custo operacional, do tempo de transporte, da distância percorrida, e a maximização do benefício e do nível de serviço, podendo esse problema ser resumido em atender uma demanda específica, a qual pode apresentar-se como entrega e/ou coleta de mercadorias ou pessoas, em uma região específica.

Segundo Parragh, Doerner e Hatl (2008A; 2008B), o problema geral de coleta e entrega pode ser dividida em duas classes distintas, onde para um melhor entendimento foram nomeada como classe 1 e classe 2.

A Classe 1 é constituída de problemas onde há transporte de cargas do depósito para os clientes e dos clientes para o depósito. Os veículos partem do depósito com a carga para atender a demanda de entrega dos consumidores. No caso das cargas recolhidas, todas devem ser entregues ao depósito. (PARRAGH, DOERNER e HATL, 2008A)

A Classe 2 é constituída de problemas onde há transporte de carga entre os próprios fornecedores. Os veículos partem do depósito, ou de qualquer ponto inicial, e percorrem os clientes para coletar e/ou entregar as mercadorias, retornando a esse ponto inicial. Quando há demanda de entrega, o veículo deverá satisfazer com os itens coletados em clientes anteriores. (PARRAGH, DOERNER e HATL, 2008B)

Para Lima (2009), o problema de coleta e entrega de mercadorias consiste em construir rotas com n veículos tais que:

- Todas as coletas e entregas sejam satisfeitas;
- A carga do veículo não pode exceder a sua capacidade;
- A rota deve ser minimizada;
- O veículo deve começar e terminar sua rota no depósito.

Ainda segundo Lima (2009), existem diversas variações do problema de coleta e entrega tais como: O Problema de Roteamento de

Veículos com Coleta e Entrega (VRPPD, do inglês Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery), O Problema de Entrega Expressa (EDP, do inglês Express Delivery Problem), O Problema de Coleta e Entrega com Contensão de Via, O Problema “Peça por uma carona” (DARP, do inglês Dial-a-Ride Problem), O Problema do Caixeiro Viajante com Coleta de Retorno (TSPB, do inglês Traveling Salesman Problem with Backhauls) , entre outros.

2.6.2. Roteiros apenas com coletas ou entregas

Os modelos teóricos são, normalmente empregados para representar não somente sistemas de transporte de coleta, mas também sistemas de distribuição física de produtos e de serviços, tais como a entrega em domicílio, de produtos comprados nas lojas de varejo ou pela internet, a distribuição de produtos dos centros de distribuição para lojas de varejo, a distribuição de bebidas em bares e restaurantes, a distribuição de dinheiro para caixas eletrônicos de bancos, a distribuição de combustíveis para postos de gasolina, a coleta de lixo urbano, a entrega domiciliar de correspondência e outros. (NOVAES, 2004)

O processo de distribuição física de produtos incorpora, nas pontas, um roteiro de coleta ou de entrega, em que o veículo visita certo número de clientes localizados numa determinada zona. O processo tradicional de roteirização dos veículos de coleta e de entrega se baseia na experiência do encarregado do depósito. (ALVARENGA e NOVAES, 2000)

Segundo Valente, Passaglia e Novaes (2003), as características básicas da coleta e distribuição de carga no transporte rodoviário podem ser visualizadas como:

- a) Uma região geográfica é dividida em zonas, cujos contornos podem ser rígidos ou, em alguns casos, podem sofrer alterações momentâneas para acomodar diferenças de demanda em regiões contíguas;
- b) Para cada zona é alocado um veículo, com uma equipe de serviço, podendo ocorrer outras situações (mais de um veículo por zona, por exemplo);

- c) A cada veículo é designado um roteiro, incluindo os locais de parada, pontos de coleta ou entrega, atendimento de serviços, a equipe que deverá atendê-los, entre outros;
- d) O serviço deverá ser realizado dentro de um tempo de ciclo predeterminado. No caso de coleta / entrega urbana, o roteiro típico inicia-se pela manhã e se encerra no fim do dia (ou antes, se o roteiro for totalmente cumprido).
- e) Os veículos são despachados a partir de um depósito, onde se efetua a triagem da mercadoria (ou serviço) em função das zonas. Nos casos em que há mais de um depósito, o problema poderá ser analisado de forma análoga, efetuando-se, para isso as divisões adequadas da demanda e/ou área geográfica a ser atendida. A localização e utilização dos depósitos precisam ser programadas.

Um dos problemas do processo de distribuição está relacionado com a variabilidade do tempo de ciclo. Este tempo transcorre desde a saída do veículo do Centro de Distribuição até o retorno ao mesmo, cobrindo a operação de coleta e entrega de carga em diversos clientes, tratando-se de uma variável aleatória fortemente influenciada por uma série de fatores exógenos, que provocam grande variabilidade no resultado final. (SINAY, CAMPOS, *et al.*, 2004)

A aleatoriedade do tempo de ciclo está relacionada com problemas de congestionamento que aumentam o tempo de viagem, com a falta de estacionamento adequado, vagas destinadas a carga e descarga dos produtos, atrasos devido a conferência de produtos, entre outros. (SINAY, CAMPOS, *et al.*, 2004)

Segundo Valente, Passaglia e Novaes (2003), os problemas de coleta ou distribuição podem apresentar dois níveis de resolução, sendo um no nível de planejamento e projeto e outro no nível operacional.

As variáveis que influenciam no dimensionamento de um processo de coleta ou distribuição, tendem a apresentar de uma maneira geral, variações estatísticas relevantes, sendo que por este motivo não é aconselhado utilizar para fazer o dimensionamento, modelos determinísticos. (VALENTE, PASSAGLIA e NOVAES, 2003)

Ainda segundo os autores supracitados, algumas condicionantes físicas temporais devem ser levadas em consideração e incorporadas à metodologia de análise e dimensionamento, de forma a

gerar resultados mais realistas. O primeiro aspecto é considerar a capacidade física do veículo de coleta ou distribuição, para levar em consideração a capacidade máxima de transporte do veículo. O segundo aspecto está relacionado à carga máxima de jornada de trabalho dos tripulantes do veículo, onde para isso se leva em consideração o número de horas trabalhadas por cada indivíduo, visando não sobrecarregá-los. O terceiro aspecto é o desequilíbrio em termos de produção de veículos que atendem zonas mais próximas do depósito e veículos que atendem zonas mais distantes, fazendo com que se tenha um tratamento diferenciado entre zonas com distâncias diferentes do depósito.

Os problemas relacionados a transporte de coleta e distribuição de mercadorias são amplamente estudados na busca de se encontrar melhores soluções.

3. PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Para Ballou (2006), as empresas tentam minimizar os custos relacionados ao transporte e garantir a qualidade no serviço, buscando sistemas mais eficientes de decisões de utilização da frota, permanecendo assim competitivas no mercado de trabalho.

Uma das formas de trabalhar a redução dos custos relacionados ao transporte está associada à roteirização dos veículos, a qual é bastante empregada em situações reais de distribuição e/ou coleta de produtos e serviços.

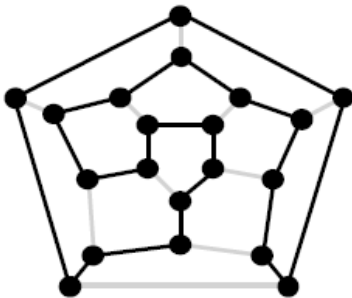
O objetivo deste capítulo é fazer um estudo sobre os Problemas de Roteirização de Veículos, onde serão apresentados conceitos, definições, características e formulações referentes, abordando primeiramente o Problema do Caixeiro Viajante e variações.

3.2. PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

Em 1859, William Rowan Hamilton criou um jogo cujo objetivo era, em um decaedro, traçar uma rota através de seus vértices, em que há de começar e terminar no mesmo ponto, e cada ponto poderia ser visitado apenas uma única vez. Este jogo ficou conhecido como ciclo hamiltoniano, o qual é ilustrado na Figura 1. (GOLDBARG e LUNA, 2000)

Este jogo deu origem a um problema bastante conhecido chamado de Problema do Caixeiro Viajante (PCV), no inglês conhecido como “traveling salesman problem (TSP)”. (GOLDBARG e LUNA, 2000)

Figura 1 - Ciclo Hamiltoniano



Fonte: Adaptado de (APPLEGATE, BIXBY, *et al.*, 2006)

O Problema do Caixeiro Viajante foi o primeiro problema de roteirização a ser estudado, sendo seu objetivo encontrar um roteiro que minimizasse a distância total percorrida. (SOUZA e GUARDIA, 2007)

Atualmente, o Problema do Caixeiro Viajante é um dos mais conhecidos problemas de otimização combinatória estudado, podendo ser descrito como sendo um conjunto de n pontos tendo o objetivo de sair de um desses pontos, chamado de origem, visitar os demais $n - 1$ pontos restantes por apenas uma única vez e voltar ao ponto de origem, fechando assim o ciclo hamiltoniano, buscando minimizar o custo total da distância percorrida entre os n pontos.

Formalmente, o problema pode ser apresentado como:

Sendo um grafo $G = (N, E)$ onde $N = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós e $E = \{1, \dots, m\}$ é o conjunto de arestas de G , e custos, c_{ij} , associados com cada aresta ligando os vértices i e j , o problema consiste em localizar o menor ciclo Hamiltoniano do grafo G . O tamanho do ciclo é calculado pelo somatório dos custos das arestas que formam o ciclo. Os nós do grafo são, frequentemente, referenciados como “cidades” e, em outras palavras, o objetivo é visitar todas as cidades passando apenas uma vez por cada cidade, retornando ao ponto de origem. (PRESTES, 2006, p. 4)

Como se pode perceber, sendo um problema de fácil compreensão e descrição, vem sendo utilizado como foco de estudos devido a três características: a primeira é por ser de grande aplicação prática; a segunda é ter relações com outros modelos de estudo; e a terceira é por ter grande dificuldade de solução (PRESTES, 2006). Com isso, tal problema vindo sendo estudado há muito tempo, fazendo com que existam inúmeros trabalhos sobre o assunto, objetivando encontrar melhorias para as soluções ou até mesmo novas alternativas. (VIEIRA, 2006)

Os métodos para a resolução deste problema podem ser classificados em Exatos e Heurísticos, (CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002; VIEIRA, 2006) os quais serão abordados com maiores detalhes no Capítulo IV.

3.2.1. Problemática

O Problema do Caixeiro Viajante vem despertando cada vez mais interesse dos pesquisadores das mais variadas áreas, por se tratar de um problema com a possibilidade de utilização em situações reais do dia-a-dia, não medindo esforços para desenvolver algoritmos cada vez mais eficientes com o objetivo de encontrar uma solução. (HERRERA, 2007; CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002)

Pelo fato de ser um problema de otimização combinatória e possuir ordem de complexidade exponencial para sua resolução, ele pertence a categoria conhecida como NP-difícil (provinda do inglês “NP-hard”). Problemas dessa categoria exigem esforço de processamento computacional bastante elevado, crescendo conforme a elevação dos pontos a serem atendidos. (CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002)

O custo computacional para resolução de um algoritmo exato do PCV é de $T = (n - 1)!$. Assim, para ter uma visão da complexidade deste, foi montada a Tabela 1, a qual apresenta os tempos que se levaria para encontrar os resultados ótimos referentes ao número de pontos a serem visitados. Para isso, levou-se em consideração que o computador que realizou tais cálculos consegue efetuar o processamento de um bilhão de cálculos por segundo.

Tabela 1 – Amostragem dos cálculos exatos para PCV

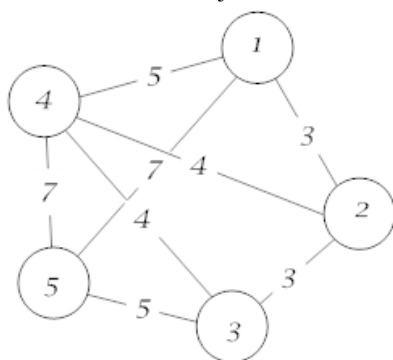
Pontos	Nº de rotas	Tempo em minutos
5	24	0,000000002
10	$3,62 \times 10^5$	0,00005
15	$8,71 \times 10^8$	20
20	$1,21 \times 10^{15}$	$3,85 \times 10^7$
23	$1,12 \times 10^{21}$	$4,12 \times 10^{11}$
25	$6,20 \times 10^{23}$	$2,48 \times 10^{14}$

Fonte: próprio autor

Entretanto, como os tempos para a solução de problemas de médio e grande porte, utilizando algoritmos exatos, não são viáveis, a alternativa é a utilização dos algoritmos heurísticos. Esse tipo de solução apesar de não garantir a solução ótima, apresenta resultados bastante satisfatórios. (PRESTES, 2006)

Graficamente, pode-se representar uma instância do PCV conforme a Figura 2, no qual foi criado um esquema com cinco cidades, representado pelo grafo $G(V, E)$ sendo que cada um dos vértices V representa um ponto e cada arco E representa os caminhos entre um par de pontos.

Figura 2 – Grafo do Caixeiro Viajante



Fonte: adaptado de (GOODRICH e TAMASSIA, 2002)

Para representar esse problema de uma forma tabular, muito utilizada nos cálculos de rotas, pode-se adotar uma matriz de distância,

conforme ilustrado na Tabela 2, contendo as distâncias entre pares de nós adjacentes.

Tabela 2- Matriz de distância do grafo

	1	2	3	4	5
1	0	3	x	5	7
2	3	0	3	4	x
3	X	3	0	4	5
4	5	4	4	0	7
5	7	x	5	7	0

Fonte: próprio autor

Porém, há uma classificação que pode ser empregada ao Problema do Caixeiro Viajante, no qual se refere a sua simetria, podendo esse ser denominado: simétrico, quando todos os pares de nós $\{i,j\}$ tem o mesmo custo entre d_{ij} e d_{ji} , ou seja, $d_{ij} = d_{ji}$, representado pela Figura 2, ou ainda assimétricos, quando a condição de simetria não é respeitada por algum dos pares de nós, sendo que , algum d_{ij} não é igual d_{ji} (CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002). Sendo assim, esse tipo de classificação pode influenciar contundentemente a escolha da rota a ser emprega.

3.2.2. Formulação

A formulação matemática do Problema de Caixeiro Viajante foi criada originalmente por Dantzig, Fulkerson e Johnson em (1954), sendo este um problema de programação 0-1 sobre um grafo $G = (N, A)$ com N nós e A arestas, representado pelas equações de (1) a (5). (NASCIMENTO, FIGUEIREDO, *et al.*, 2004)

$$\text{Minimizar} \quad z = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (5)$$

Nesta formulação n é um conjunto de nós da rede; S é um subgrafo de G ; e $|S|$ é o número de vértices do subgrafo S . Quando o arco $x_{ij} \in A$ for escolhido para integrar a solução, então $x_{ij} = 1$, caso contrário, $x_{ij} = 0$. Sendo assim, a equação (1) faz a minimização da função de custo da rota; (2) e (3) fazem com que cada um dos vértices possua uma ligação para determinar seu sucessor e predecessor; (4) faz com que haja um descarte nas subrotas que não fazem parte do circuito hamiltoniano. (GOLDBARG e LUNA, 2000)

3.2.3. Aplicabilidade

Existem diversas aplicações para o Problema do Caixeiro Viajante, podendo ter sua utilização diretamente relacionada em situações reais como construções de rotas, ou ainda utilizada para solucionar problemas como: (CORDENONSI, 2008)

- a) Fabricação de placas de circuitos eletrônicos;
- b) Roteamento de veículos;
- c) Sequenciamento de tarefas.

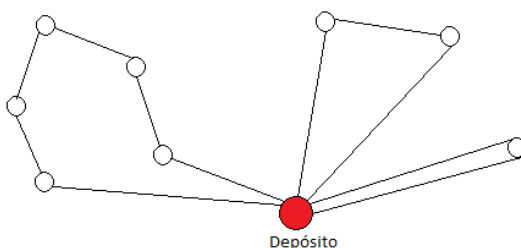
Sendo o Problema do Caixeiro Viajante, o primeiro problema estudado, o mesmo fez com que novos estudos surgissem, e desde então, novas restrições vêm sendo incorporadas a ele, com a finalidade de melhorar cada vez mais a representação dos diversos tipos de problemas que envolvem os roteiros. (SOUZA e GUARDIA, 2007)

3.3. PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS VIAJANTES

O Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes (PCVM), conhecido também como “Multiple Traveling Saleman Problem” ou “MTSP”, é uma extensão do Problema do Caixeiro Viajante, podendo ser relacionado a diversas aplicações de cotidiano como, por exemplo, otimização de operações logísticas, otimização de produção, entre outras. (MASSUTI e CASTRO, 2007)

Este problema consiste em determinar os percursos a serem realizados por M veículos, os quais irão partir de uma ponto inicial, visitando $n - 1$ pontos, de forma que cada um desses seja visitado apenas uma única vez por um único veículo. Este processo pode ser observado na Figura 3. (BELFIORI, 2006)

Figura 3 - Múltiplos Caixeiros Viajantes



Fonte: Adaptado de (BODIN, GOLDEN, et al., 1983)

O Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes visa à minimização do custo total da rota, podendo ser este expresso em função

da distância percorrida, do tempo de percurso ou de qualquer outra variante possível. Para este problema não são inseridas restrições operacionais, como capacidade do veículo, janela de tempo, entre outros. Além disso, a demanda para esse problema é determinística. (MASSUTI e CASTRO, 2007)

O estudo realizado neste trabalho é caracterizado como um problema de múltiplos caixeiros viajantes, devido o cenário possuir nove distritos e um depósito central. Contudo, haverá para cada distrito um determinado veículo que irá atender os pontos a serem visitados. Todos os veículos sairão do depósito, visitarão seus pontos uma única vez e voltarão ao depósito.

3.4. PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Os problemas de roteamento de veículos podem ser utilizados para resolver diversos tipos de problemas, possuindo diversas aplicações práticas, envolvendo setores como indústria, o comércio e serviços. Entre as aplicações pode-se destacar o transporte de pessoas, entrega e/ou coleta de mercadorias, coleta de lixo hospitalar, entrega de encomendas, operações de fretes, distribuição de jornais, distribuição de bebidas, distribuição de produtos químicos, entre outros (CORDENONSI e SANTOS, 2001).

Os conceitos de roteirização de veículos são utilizados na construção de rotas a serem cumpridas por veículos de uma frota, com o intuito de visitar um conjunto de pontos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. (CUNHA, 2000)

O Problema de Roteirização de Veículos (PRV) foi introduzido por Dantzig e Ramser (1959), tornando-se um dos problemas mais estudados na área de Otimização Combinatória, e tem por objetivo definir rotas entre o depósito e os pontos a serem visitados, buscando minimizar a distância total percorrida, o número de veículos ou o tempo de percurso. (ASSIS, 2007)

O primeiro problema a ser estudado foi o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), o qual Novaes (2004) afirma que na literatura técnica, esse tipo de problema se caracteriza como um problema sem restrição, isso porque os pontos a serem visitados nos diversos roteiros já foram separados previamente e as restrições de tempo de capacidade dos veículos já foram resolvidas, restando apenas encontrar um roteiro,

minimizando o percurso a ser percorrido dentro de um determinado cenário.

Porém, a definição do Problema Básico de Roteirização de Veículo segue a mesma definição do Problema do Caixeiro Viajante, tendo seu diferencial na inserção de uma restrição que diz respeito à capacidade do Veículo. Mesmo assim, ignora uma diversidade de restrições e extensões utilizadas frequentemente em situações reais. (SILVA, 2007)

Desde seu surgimento, muitos estudos vêm sendo apresentados, e novas restrições vêm sendo inseridas ao PCV, objetivando apresentar melhorias na solução dos diversos tipos de problemas relacionados. Com isso, o problema de roteirização de veículos ganhou grande amplitude, e desde então envolve um grande conjunto com variados tipos de problemas e classificações (CUNHA, 2000). Entretanto, esses problemas podem ser classificados em diversas categorias e tipos, sendo que os mesmos diferem entre si por vários aspectos como o tipo de operação, tipo de carga entre outros. (SILVA, 2007)

3.4.1. Classificação do Problema de Roteirização de Veículos

Ao buscar a modelagem e a solução dos problemas de roteirização, são encontradas dificuldades que são oriundas das grandes quantidades de variáveis que caracterizam o problema. Uma classificação adequada é fundamental para encontrar soluções com maior precisão, portanto, é importante a identificação e modelagem dos problemas, com o intuito de propor uma solução coerente. (MIURA, 2008)

Vários autores definiram parâmetros para a taxonomia dos problemas de roteirização de veículos, através de classificações estudadas. Segundo Tenkley (2008), as características podem definir as possíveis alternativas para encontrar o problema.

As características dos problemas de roteamento apresentadas na Tabela 3, servem como ferramenta para classificar os problemas como também buscar algoritmos para serem utilizados.

Tabela 3 - Caracterização do problema de roteirização

Características	Alternativas Possíveis
Objetivo	Minimizar custos fixos Minimizar custos de operação na rota Minimizar o número de veículos necessários
Tipo de Frota disponível	Homogênea Heterogenia
Número de docas	Única Várias
Operação	Entrega Coleta Entrega e Coleta
Tempo para servir um determinado arco ou nó	Sem restrição Janela de tempo Tempo Específico
Tamanho da frota	Um veículo Mais de um veículo (limitada) Mais de um veículo (ilimitada)
Natureza da demanda e parâmetros	Determinística Estocástica
Localização da demanda	Nos vértices Nos arcos Ambos
Grafo de substrato	Direcionado Não direcionado Misto
Restrições de coleta/entrega	Certos veículos proibidos de visitar certos clientes Clientes requerem várias visitas em um determinado período de tempo Clientes podem ser servidos por mais de um veículo
Jornada	Sem restrição de duração Limite de duração Interrupções para almoço, etc.
Custos	Variáveis (associado à rota escolhida) Fixos Custo do transporte alternativo para a demanda não atendida

Fonte: (TENKLEY, 2008)

Além disso, segundo Paula (2009), diversos autores apresentam trabalhos relacionados à classificação dos problemas de roteirização de veículos, podendo-se destacar Bodin, Golden, et al., (1983) que focaram os estudos sobre a ótica espacial e/ou temporal, com isso, criaram uma classificação baseando-se em três grupos:

Problema de roteirização pura (PRV) – definido como um problema espacial, onde existe um conjunto de nós e/ou arcos que devem ser atendidos. Sendo assim, busca-se definir a sequência dos locais que cada veículo deverá visitar (rota), objetivando a minimização do custo total do transporte. Este problema não leva em consideração as variáveis condicionantes temporais para a elaboração dos roteiros de coleta e/ou entrega de mercadorias e serviços, porém em alguns casos, considera-se como restrição o comprimento máximo da rota (ENOMOTO e LIMA, 2007). Pode-se destacar como problemas de roteirização pura o problema do caixeiro viajante, o do carteiro chinês e o de múltiplos caixeiros viajantes. (NETO e LIMA, 2005)

Problema de roteirização com programação de veículos (PRPVJT) – definido como um problema que envolve as relações de prioridade entre as atividades envolvidas no processo, além da restrição temporal ou janela de tempo (horário de atendimento dos clientes, entre outros). Derivados do (PRV), estes problemas são bastante vivenciados no dia-a-dia, com um cunho realístico, onde cada ponto tem uma ou mais janelas de tempo para serem atendidos. (ENOMOTO e LIMA, 2007; NETO e LIMA, 2005)

Problema de roteirização com programação de veículos e de tripulação – são considerados problemas extremamente complexos, além disso, caracterizam-se por contar com restrições adicionais relacionadas ao tempo em que várias atividades devem ser executadas. Com isso, pode-se dividir o foco do problema na sequência das atividades para os veículos no espaço e no tempo, como também, na movimentação da tripulação no espaço e no tempo. (ENOMOTO e LIMA, 2007; NETO e LIMA, 2005)

Ainda segundo Paula (2009), outra que pode ser destacada é proposta por Ronen (1988), baseia-se em 3 (três) grupos distintos em relação ao ambiente operacional e ao objetivo. Sendo esses classificados como:

Transporte de passageiros – associados diretamente aos problemas relacionados com o transporte de ônibus, serviços de táxi, transporte escolar de ônibus e transporte de pessoas em geral.

Prestação de serviços – tem seu foco em serviços de programação e roteirização voltados à comunidade, abrangendo a coleta de lixo, entrega de correspondências, entre outros.

Roteirização e Programação ou transporte de Carga – esta categorização envolve 12 (doze) critérios de classificação, os quais são: tamanho da frota, composição da frota, estrutura de custos da frota, componentes de custo, número de bases de origem e destino dos veículos, natureza da demanda, Tipo de operação, número de viagens por veículo num determinado período, duração ou tempo máximo permitido de viagem, tipo de entrega, distâncias e tempos de viagens e função objetivo do modelo.

Para Assad (1988) citado por (SILVA, 2007), há uma enorme dificuldade para encontrar um esquema de classificação adequada. Essa dificuldade está em considerar ou não às restrições do problema e o método de solução proposta, sugerindo assim, que cada problema prático seja caracterizado de forma particular, levando em consideração um conjunto de elementos. Uma possível classificação apresentada pelo autor está baseada no tempo em que as informações de demanda estão disponíveis. Nos problemas tradicionais supõe-se que a demanda é conhecida (determinística), contrapondo à roteirização dinâmica onde a demanda é estocástica, ou seja, ocorre em tempo real.

O autor ainda propõe um conjunto de itens para caracterização dos problemas de roteirização como:

- a) Natureza da demanda: coleta, entrega, coleta e entrega, apenas uma mercadoria, múltiplas mercadorias, prioridade no atendimento aos clientes;
- b) Frota de veículos: homogênea, heterogênea, restrição de capacidade, frota fixa ou variável, frota só para um único depósito, frota para diversos depósitos;
- c) Requisitos de pessoal: duração da jornada de trabalho, hora extra, número certo ou não de motoristas, horário do início da jornada de trabalho, horário de almoço, horário para outro tipo de parada;
- d) Requisitos de disponibilidade: tempo de viagem, localização do veículo, disponibilidade geográfica.

3.4.2. Problemas Clássicos de Roteirização de Veículos

Segundo Beldiori (2006) existem alguns problemas clássicos de Roteirização de Veículos como:

- Problema do Carteiro Chinês (Chinese Postman Problem - CPP) - O CPP ocorre em situações em que é necessário percorrer todos os arcos de um grafo, e está relacionado com a determinação de caminhos e circuitos Euclidianos de um grafo, ou seja, dado um Grafo $G = (V, E)$, onde V é um conjunto de vértices e E é um conjunto de arestas, onde o objetivo é encontrar um circuito de custo mínimo, que passe pelo menos uma vez por cada aresta de G . O CPP pode ser dividido em: não orientado, orientado ou misto.
- Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (Multi-Depot Vehicle Routing Problem - MDVRP) - É uma generalização do VRP, porém contendo mais de um depósito. Caracteriza-se pelo veículo sair de um determinado depósito efetuar sua rota e retornar para qualquer um dos depósitos contidos no processo, trabalhando com a restrição do limite de capacidade do veículo, além da demanda que é determinística.
- Problema de Roteirização de Veículos com Entregas Fracionadas (Vehicle Routing Problem with Split Deliveries - VRPSD) - É uma generalização do VRP, porém, neste problema os clientes podem ter sua demanda maior que a capacidade dos veículos, podendo receber diversas entregas providas de diversos veículos.
- Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo (Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows - VRSPWT ou VRPTW) - É uma generalização do VRP, porém, neste problema são consideradas restrições de janela de tempo para atendimento.

Segundo Silva (2007) pode-se encontrar na literatura mais alguns problemas de roteirização de veículos como: Problema de Roteirização de Veículos com Demanda em Arcos (*Capacitated Arc Routing Problem* – CARP); Problema de Roteirização de Veículos com Demanda Estocástica (*Stochastic Vehicle Routing Problem* – SVRP); Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma frota Homogênea de Veículos (*Fleet Size and Vehicle Routing Problem* – FSVRP);

Problema de Roteirização de uma frota Heterogênea Fixa (*Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem* – HFFVRP); Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma frota de Veículos Heterogênea (*Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem* – FSMVRP); Problema de Roteirização de Veículo Multi-Período ou Periódico (*Periodic Vehicle Routing Problem* – PVRP); Problema de Roteirização de Veículo com Tempo Dependente (*Time Dependent Vehicle Routing Problem* – TDVRP); Problema de Roteirização (e Programação) de Veículos com Janelas de Tempo Flexíveis (*Vehicle Routing (and Scheduling) Problem with “Soft” Time Windows* - VRSPSTW ou VRPSTW) entre inúmeros outros.

Atualmente existem inúmeros métodos visando a busca de soluções referentes ao Problema de Roteirização de Veículos, os quais são estudados no próximo capítulo.

4. MÉTODOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

4.1. INTRODUÇÃO

Um algoritmo é um procedimento computacional que recebe um ou mais valores de entrada e gera um ou mais valores de saída (CORMEN, LEISERSON, *et al.*, 2002). Este procedimento é utilizado para resolver problemas das mais diferentes áreas, como por exemplo, problemas de otimização combinatória.

Para os esses tipos de problemas, são utilizados métodos de resolução, que podem ser exatos ou heurísticos (PRESTES, 2006). Cada um desses métodos tem suas características particulares, porém seu principal diferencial é que os métodos exatos são utilizados para resolverem problemas de baixa complexidade e as heurísticas de média e alta. (CRISTAL, 2001)

Neste capítulo, serão apresentados conceitos e os métodos de cada um desses agrupamentos, porém, será feito um estudo mais aprofundado aos métodos utilizados efetivamente para resolução do modelo apresentado neste trabalho. Como o modelo proposto neste trabalho é caracterizado como sendo um Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes, o foco das descrições dos métodos que serão abordados são diretamente relacionados ao Caixeiro Viajante.

4.2. MÉTODOS DE RESOLUÇÃO

Para a resolução de problemas de otimização combinatória, busca-se encontrar os melhores resultados possíveis. Todavia, como já estudado anteriormente, existem diversos tipos de problemas que são inviáveis de obter uma solução ótima, devido a sua complexidade, o tempo gasto para encontrar essa solução inviabilizar completamente qualquer resolução de problema. Para esses casos, utilizam-se métodos que não garantem a melhor solução, porém gerem soluções aceitáveis para resolver o problema.

Neste contexto, são utilizados métodos matemáticos que podem ser divididos em duas categorias: os métodos exatos e os

métodos aproximativos, conhecidos como heurísticas e metaheurísticas (HERRERA, 2007).

4.3. MÉTODOS EXATOS

Os Métodos Exatos, para encontrar uma solução ótima de determinado problema, realizam a construção de modelos matemáticos de otimização e a implementação de algoritmos específicos. (TEMPONI, 2007)

Assim, solução somente será considerada ótima se não existir outra solução melhor que a já encontrada, respeitando os critérios de otimização estabelecidos. Para isso, este tipo de método, faz a verificação de todas as possibilidades possíveis para resolução do problema resultando no melhor valor encontrado, garantindo assim, o retorno da melhor solução. (ROSA, 2009)

Entretanto, para problemas do tipo NP-hard, como é o caso do Problema do Caixeiro Viajante, é recomendada a utilização de métodos Heurísticos, principalmente para problemas considerados de grande porte, onde os Métodos Exatos se tornariam inviáveis, devido a demora na geração do resultado. (SOSA, GALVÃO e GANDELMAN, 2007)

Existem vantagens e desvantagens na utilização dos métodos exatos em problemas de otimização combinatória. Entretanto, quando se utiliza um método exato para a resolução de um problema, tem-se a garantia que sua solução é ótima. (TEMPONI, 2007)

4.4. MÉTODOS HEURÍSTICOS

Segundo Rodrigues (2000) os Métodos Heurísticos podem ser também conhecidos como Métodos Aproximativos. O termo heurístico provém do grego *heuriskein* que significa descobrir.

Em termos matemáticos as heurísticas passaram a serem algoritmos baseados em modelos cognitivos, fundamentando seu desenvolvimento em modelos ou experiências já existentes. (CORDENONSI, 2008)

Os métodos heurísticos são caracterizados por encontrar uma solução do problema em tempo de execução polinomial. Todavia, são técnicas utilizadas em busca de uma solução considerada boa, fazendo uso de recursos computacionais considerados aceitáveis, com isso, garantido uma solução viável para o problema. (GOLDBARG e LUNA, 2000)

Os procedimentos heurísticos para resolução do Problema do Caixeiro Viajante podem ser divididos em dois grupos: heurísticas construtivas e heurísticas de melhoria de roteiros. (SAUER, 2007)

4.4.1. Heurísticas Construtivas

As Heurísticas Construtivas têm a funcionalidade realizar a construção do roteiro para os veículos, buscando sempre uma solução inicial viável. Assim, inicia a construção do roteiro escolhendo dois pontos do cenário e vai agregando novos pontos até a formação do roteiro final. (NOVAES, 2004)

Alguns algoritmos importantes considerados como construtivos apresentados por Fontes (2006) são:

- a) Vizinho mais próximo – este algoritmo consiste em construir uma rota partindo de um ponto inicial determinado, onde consecutivamente, deverão ser inseridos os pontos que estiverem mais próximos do último ponto escolhido (FONTES, 2006). Uma descrição do método pode ser vista no Quadro 1.

Quadro 1- Vizinho Mais Próximo

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> i. Escolha um vértice qualquer; ii. Encontre um vértice não pertencente ao caminho, porém que seja o mais próximo possível do último vértice adicionado, adicionando-o no final do último caminho em formação; iii. Repetir o item ii até que o caminho envolva todos os vértices, e para finalizar unir o último vértice ao primeiro, fechando a rota. |
|---|

Fonte: (NASCIMENTO, FIGUEIREDO, *et al.*, 2004)

- b) Inserção mais próxima – este algoritmo inicia-se formando um subgrafo com apenas um vértice. Posteriormente, encontra outro vértice para formar a subrota $i-k-i$, em que o custo de C_{ik} seja mínimo. Tendo uma subrota, seleciona-se o próximo vértice mais próximo de qualquer um dos vértices da subrota, inserindo-o entre $i-k$ ou $k-i$ (Quadro 2) . (GOLDBARG e LUNA, 2000)

Quadro 2- Inserção do Mais Próximo

i.	Iniciar com um subgrafo composto apenas pelo i -ésimo vértice;
ii.	Encontrar um vértice $k \neq i$ tal que C_{ik} seja mínimo e forme a subrota $i-k-i$;
iii.	Dada uma subrota, encontre um vértice k não pertencente à mesma, mas que seja o mais próximo de todos os vértices pertencentes a ela;
iv.	Encontre o arco (i, j) , nesta subrota, para o qual $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$ é mínimo e insira k entre i e j ;
v.	Se caso for encontrado um ciclo hamiltoniano, o processo encerrou; caso contrário vá continuar no item iii.

Fonte: (NASCIMENTO, FIGUEIREDO, *et al.*, 2004)

- c) Inserção mais barata – iniciar o algoritmo selecionando uma subrota contendo três pontos, onde a cada passo adiciona-se um novo vértice fora do ciclo corrente. O vértice é escolhido aplicando-se a fórmula $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$, a qual deverá ter o menor custo a partir desta(Quadro 3). (FONTES, 2006)

Quadro 3 - Inserção mais Barata

i.	Iniciar o subgrafo composto de 3 pontos;
ii.	Encontre um vértice k não pertencente ao ciclo e o par de arestas (i,k) e (k,j) , que ligam o vértice k ao ciclo, minimizando $c_{ik}+c_{kj}-c_{ij}$;
iii.	Inserir as arestas encontradas e retirar a aresta (i,j) ;
iv.	Caso seja encontrado um ciclo hamiltoniano, encerre; caso contrário vá para o item ii.

Fonte: (RODRIGUES, 2000; FONTES, 2006)

- d) Métodos das Economias – a ideia básica deste método é partir da pior situação possível, e seguindo conforme o Quadro 4.

Quadro 4- Economias de Clark e Wright

- | | |
|------|---|
| i. | Escolher um vértice como o inicial; |
| ii. | Calcular as economias através da fórmula $s_{ij} = c_{1i} + c_{1j} - c_{ij}$; $i, j = 2, \dots, n$; |
| iii. | Ordenar os resultados obtidos no item ii do maior para o menor; |
| iv. | Utilizar os resultados obtidos do maior para o menor pela junção apropriada dos vértices i, j ; |
| v. | Repetir o item iv até que o ciclo hamiltoniano seja formado. |

Fonte: (RODRIGUES, 2000)

Neste trabalho foi adotado como heurística construtiva a inserção do mais distante, conhecida também na literatura técnica *farthest insertion*.

O processo de construção dessa heurística inicia-se identificando um ponto de origem i para formar uma subrota. Para cada um dos pontos que não estão nesta subrota é calculada a distância em relação a i e escolhido o ponto j de maior distância, formando uma nova subrota com os pontos i e j . Com isso, há uma inserção do ponto k na subrota atual i e j , onde se liga o ponto k de forma que i se ligue a k e k se ligue a j , sendo minimizado por $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$. Com isso, na subrota criada, é retirado o arco entre i, j . O processo irá se repetindo até que não haja mais pontos a serem incluídos na subrota. (FONTES, 2006)

Este algoritmo faz a construção de uma solução que inicia primeiramente abordando os pontos externos a serem inseridos para depois fazer a inserção dos pontos localizados mais próximos do meio, fazendo com que o algoritmo não gere cruzamentos. (CORDENONSI, 2008)

A representação do algoritmo está disponível no Quadro 5.

Quadro 5- Inserção mais Distante

- | | |
|------|--|
| i. | Iniciar com um subgrafo composto apenas pelo i -ésimo vértice; |
| ii. | Encontrar um vértice $k \neq i$ tal que c_{ik} seja mínimo e forme a subrota $i-k-i$; |
| iii. | Dada uma subrota, encontre um vértice k não pertencente à mesma, mas que seja o mais distante de todos os vértices pertencentes a ela; |
| iv. | Encontre o arco (i, j) , nesta subrota, para o qual $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$ é mínimo e insira k entre i e j ; |
| v. | Se caso for encontrado um ciclo hamiltoniano, o processo encerrou; caso contrário vá continuar no item iii. |

Fonte: (NASCIMENTO, FIGUEIREDO, *et al.*, 2004)

As heurísticas construtivas tem o objetivo de fazer a construção de uma rota inicial, utilizando soluções viáveis. Neste processo, se podem utilizar heurísticas para fazer o aperfeiçoamento da solução encontrada, onde para isso, faz-se o uso de heurísticas de melhoramento.

4.4.2. Heurísticas de Melhoramento

As Heurísticas de Melhoramento, conhecidas, também, como heurísticas de refinamento ou aperfeiçoamento, começam utilizando uma solução inicial completa, já obtida com o auxílio de um método construtivo ou de métodos aleatórios, onde tentam encontrar uma solução de melhor qualidade na vizinhança. Caso seja encontrada uma solução melhor que a solução corrente, a mesma será substituída. O processo de verificação para melhoria da rota continua até que o critério de parada seja alcançado ou não haja soluções melhores (FRAGA, 2006). De forma resumida, esses métodos procuram melhorar o roteiro através de algum outro método.

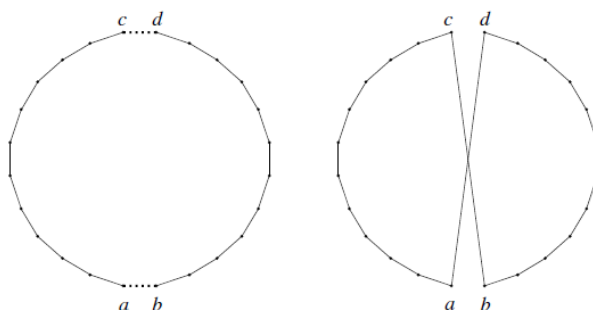
Lin e Kernighan (1973), propuseram a heurística de melhoramento conhecida como k -opt, visando sua utilização na melhoria das rotas. Trata-se de uma estratégia de troca de arestas que podem ser usadas para melhoria de uma solução obtida por algum algoritmo de construção. Assim, k arcos são removidos do roteiro do

PCV e substituídos por outros k arcos, em ordem diferente, com a finalidade de reduzir uma função objetivo. Essa heurística foi escolhida por ser indicada a problemas em que se deseja melhorar roteiros existentes (RIBEIRO e LORENA, 2005). Para esse tipo de método, quanto maior for o valor da variável k , maiores são as chances de se encontrar soluções melhores, porém acarretando no aumento do custo operacional, pois este está diretamente relacionado com o tamanho de k . Sendo assim, na maioria dos casos, adota-se o valor de k entre dois e três, ou seja, os métodos mais utilizados para melhoria de roteiro são o 2-opt e o 3-opt. (NOVAES, 2004; LAPORTE, 1992)

4.4.2.1. *Método 2-opt*

A heurística 2-opt foi proposta por Croes (1958). Nessa heurística são realizadas trocas entre dois arcos com o objetivo de encontrar uma melhora na solução atual. Caso haja a detecção da melhoria da solução em algumas dessas trocas, esta é assumida como solução atual. Este processo termina quando não for mais possível realizar trocas que melhorem a solução, ou algum limite de parada seja alcançado. (LAPORTE, 1992; NOVAES, 2004; CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002)

Figura 4- Ilustração da troca do 2-opt



Fonte: (JOHNSON e MCGEOCH, 2003)

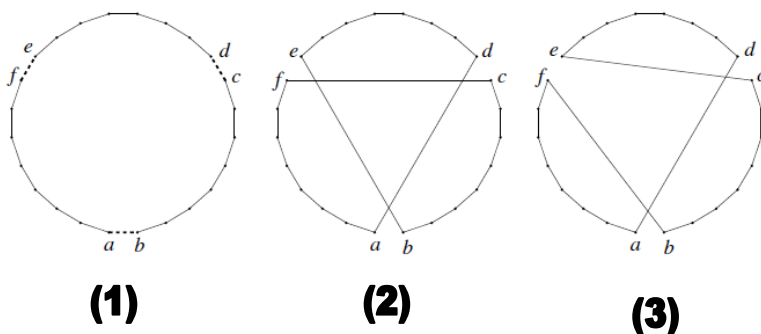
A Figura 4 apresenta o processo de troca entre as arestas, sendo que a ligação inicial se baseava nas combinações (a,b) e (c,d). Após a primeira troca, a rota resultante é definida como a combinação

dos pontos (a,d) e de (b, c), sendo que esta só irá substituir a primeira se o caminho total for menor.

4.4.2.2. Método 3-opt

A heurística 3-opt foi introduzida por Lin (1965), sendo muito semelhante a 2-opt, em relação ao conceito utilizado, diferenciando-se em relação ao número de arcos a serem trocados, passando de dois para três. (GUTIN e PUNNEN, 2002).

Figura 5 - Duas possibilidade de movimento do 3-opt



Fonte: (JOHNSON e MCGEOCH, 2003)

A Figura 5 ilustra um processo de trocas da heurística 3-opt, onde são escolhidas um trio de arcos a serem realizados os testes, representados pelo passo 1 da figura, onde são representadas pelas arestas (a,b), (c,d) e (e,f). Após ser encontrada uma rota de custo menor, é efetuada a troca, resultando nas arestas (a,d), (e,b) e (f,c), conforme passo 2. O processo continua sendo realizado e efetuando trocas até que um resultado aceitável seja encontrado ou quando uma determinada condição de parada for encontrada, ilustrado pelo passo 3.. (CUNHA, BONASSER e ABRAHÃO, 2002; NOVAES, 2004)

Um estudo realizado por Cunha, Bonasser e Abrahão (2002), indicam que a solução inicial obtida (heurística construtiva), interfere diretamente nos resultados das heurísticas de melhoria, e que a solução 3-opt tem seu tempo de processamento computacional significativamente maior que o tempo da 2-opt, porém trazendo resultados mais eficientes. Todavia, Rodrigues (2000) realizou

avaliações comparando as duas heurísticas estudadas, no qual o 3-opt demonstrou-se em média melhor do que 2-opt devido retornar melhores resultados.

Sendo assim, para o modelo proposto a heurística utilizada para melhoria do roteiro foi a 3-opt.

4.5. METAHEURÍSTICAS

As metaheurísticas são formas de encontrar soluções satisfatórias para problemas complexos, sendo definida por Osman e Laporte (1996), como sendo um processo no qual se faz a orientação de uma heurística de forma iterativa combinando de forma inteligentes vários conceitos de exploração e aproveitamento no espaço de busca, visando utilizar estratégias de aprendizagem, a fim de encontrar soluções mais eficientes.

Para uma melhor identificação, Blum e Roli (2003), sintetizaram algumas propriedades fundamentais para as metaheurísticas, sendo elas:

- i. Metaheurísticas são estratégias para orientar o processo de busca;
- ii. Explorar de forma eficiente o espaço de busca para encontrar soluções ótimas;
- iii. Técnicas que constituem as metaheurísticas variam entre procedimentos de busca local até processos complexos de aprendizado;
- iv. Inseridos mecanismos de saída para ótimos locais no campo de busca;
- v. As metaheurísticas não se limitam a solução de um determinado problema;
- vi. Utiliza-se de um conhecimento específico do problema por meio de heurísticas que são controladas por meio de estratégias de maior nível.
- vii. Armazenam experiências para reutilizar durante a busca.

Todavia, metaheurísticas utilizam filosofias próprias como estratégia de busca, objetivando escapar de mínimos locais, a fim de explorar outros espaços de busca por soluções ainda melhores. Com isso, pode-se dizer que metaheurísticas são mecanismos de alto nível para explorar espaços de busca, cada uma usando um determinado tipo de estratégia. (NETO e BECCENERI, 2009)

Dentre as Metaheurísticas mais conhecidas, pode-se citar: Colônia de Formigas (ACO), Algoritmo Genético (AG), Busca Tabu (TS), Recozimento Simulado (SA – Simulated Anneling), entre outros. (CHAVES, 2009)

Este trabalho se limitará ao estudo do AG, devido a sua utilização no modelo aplicado.

4.5.1. Algoritmo Genético

O algoritmo genético foi inspirado na teoria da evolução das espécies de Charles Darwin e proposto por John Holland (1975). Este algoritmo faz parte da classe dos algoritmos evolutivos, os quais utilizam técnicas inspiradas na biologia evolutiva. (RODRIGUES, 2000)

A concepção deste processo está fundamentada na evolução natural, onde se busca a melhor solução para os problemas de otimização, utilizado um processo iterativo (FILITO, 2008).

Portanto, o passo inicial de um AG é a geração da população inicial de cromossomos. Esta população é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Durante o processo evolutivo, esta população é analisada e cada cromossomo recebe uma avaliação (aptidão) que reflete a qualidade da solução que ele representa. Em geral, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados. Os membros selecionados podem sofrer modificações em suas características fundamentais através dos operadores de cruzamento (crossover) e mutação, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. (RIBEIRO e LORENA, 2005)

O cromossomo é constituído por vários genes e representa cada indivíduo da população (FONTES, 2006).

Quadro 6 - Algoritmo Genético

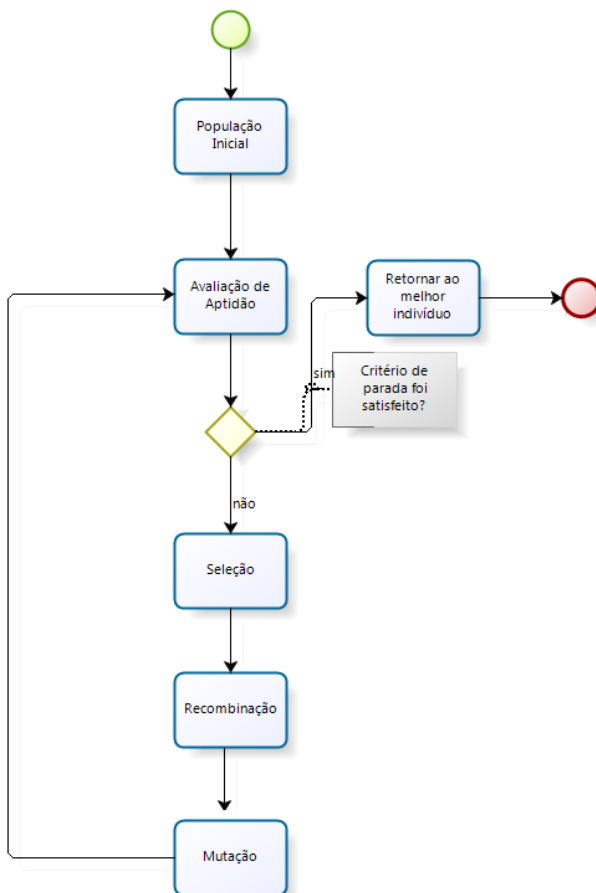
- i. $P \leftarrow$ população inicial;
- ii. Avaliar P ;
- iii. Enquanto a condição não estiver satisfeita faça
- iv. $P_o \leftarrow$ Seleção(P);
- v. $P \leftarrow$ Cruzamentos (P_o);
- vi. $P \leftarrow$ Mutações (P);
- vii. Avaliar (P);
- viii. Fim enquanto
- ix. Solução $\leftarrow P$;

Fonte: (FONTES, 2006)

O Quadro 6 apresenta a estrutura resumida do Algoritmo Genético, onde, primeiramente é gerada uma população inicial de indivíduos (cromossomos) e em seguida é realizada uma avaliação (aptidão) da população e inicia-se uma sequência de operações envolvendo os operadores de seleção, cruzamento e mutação até que uma condição pré-definida seja respeitada. Essas operações são realizadas na tentativa de melhoramento da população. (RIBEIRO e LORENA, 2005)

Assim, a Figura 6 apresenta graficamente a estrutura básica de um algoritmo genético.

Figura 6 - Estrutura básica do Algoritmo Genético



Fonte: Próprio autor.

O Algoritmo Genético   utilizado no modelo proposto para roteirizar os clientes transferidos dos veículos regulares para o veículo auxiliar.

5. MODELO PROPOSTO

5.1. INTRODUÇÃO

O modelo proposto, apresentado neste trabalho, considera o problema de roteirização dinâmica de veículos, em que parte das tarefas não realizadas, pertencentes a roteiros programados, é transferida para um veículo auxiliar que realiza suas tarefas de forma dinâmica. Problemas com esta característica estão associados a situações dinâmicas diversas, com a alocação eficiente de veículos a tarefas, tais como coleta e entrega de mercadorias, realização de serviços (manutenção, atendimento de emergências, etc.).

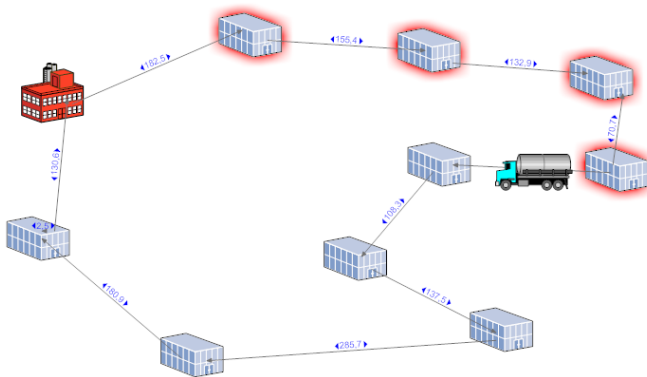
Neste capítulo, é apresentada a situação do problema inserida numa região urbana \mathfrak{R} , onde é descrito um método de zoneamento e fatores considerados no problema, de modo a manter uma homogeneidade entre as zonas (distritos).

São aplicadas simulações, considerando o problema de roteirização estática, bem como o problema de roteirização dinâmica e, ao problema dinâmico, é considerado um veículo auxiliar para ajudar na realização de tarefas transferidas.

5.2. O PROBLEMA E A PROPOSTA

O caso tratado neste trabalho considera um problema de roteirização, composto de uma frota homogênea de veículos que atendem uma região urbana \mathfrak{R} e um depósito central. Cada veículo é alocado a um distrito, ou zona. Os veículos deixam o depósito, se deslocam até o distrito, percorrem uma rota ótima obtida através de um *PCV* (Problema do Caixeiro Viajante), realizam os serviços em cada cliente, e retornam ao depósito quando todas as tarefas forem cumpridas, ou quando o tempo máximo de jornada de trabalho se esgotar (Figura 7).

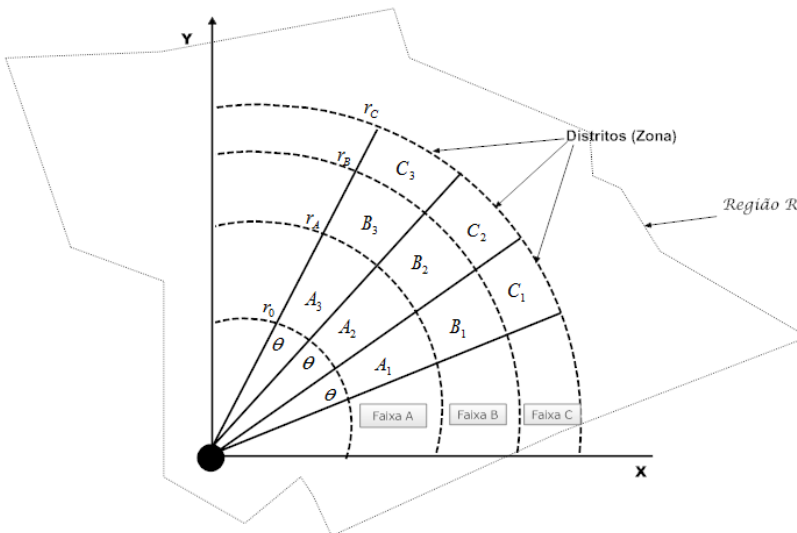
Figura 7 - Roteiro de um veículo regular em determinado distrito



Fonte: próprio autor

No modelo proposto, foi considerada uma região \mathcal{R} de representação, contendo nove distritos, distribuídos em três anéis circulares conforme Figura 8.

Figura 8- Região de representação do cenário adotado



Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

Em simulações e análise de problemas de distribuição com apenas um depósito central, a representação de distritos em forma de cunhas (*wedges*) é bastante utilizado. Segundo Newell e Daganzo (1986), este tipo de representação pode ser empregado pelo fato de que os distritos tendem a ser alongados na direção do depósito. (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

5.2.1. Equalização de esforços entre distritos e tempo de ciclo

Com o intuito de manter os esforços entre os distritos equalizados foi necessário definir algumas premissas. Para isso, considerou-se a densidade δ , de clientes cadastrados nas regiões a serem atendidas, como sendo constante. Assim, quando houver uma possível alteração do número de clientes por zona, há uma acomodação por meio de uma alteração proporcional de tamanho nos distritos.

Considerando nc_i : número de clientes cadastrados em um distrito i qualquer; p : a probabilidade de um determinado cliente cadastrado solicitar serviço, em um determinado dia. Dessa forma, o número de visitas programadas para o roteiro i (n_i), num dia qualquer, é determinado por uma distribuição binomial com média $p \times nc_i$. Assim, para cada zona i a área do distrito será $S_i = nc_i / \delta$.

Deve ser levado em consideração que, com o intuito de facilitar os cálculos, os distritos pertencentes a mesma faixa possuem a mesma área e o mesmo número de clientes cadastrados, ou seja, A1, A2 e A3 (Figura 8) tem mesma área e número de clientes. Porém, é importante salientar que em faixas diferentes, o número de clientes difere, devido à distância entre a faixa e o depósito central, tendo em vista que o veículo consome mais ou menos tempo, dependendo da distância depósito-zona e zona-depósito. Sendo assim passa-se, nesse momento, a considerar nc_A , nc_B e nc_C , como o número de clientes cadastrados nos distritos das faixas A, B e C, respectivamente.

Como citado anteriormente, as tarefas a serem realizadas devem respeitar uma restrição de tempo máximo da jornada diária de trabalho, considerando H , para sua representação. Para estimar o tempo útil TU_A , para execução das tarefas dentro de um determinado distrito da faixa A, deve-se descontar do tempo total (H) do tempo dos

percursos de ida e volta entre o depósito e o distrito, de acordo com a seguinte expressão:

$$TU_A = H - \frac{2kr_0}{v}, \quad (6)$$

onde v é a velocidade média nos percursos de ida e volta do depósito ao distrito, r_0 a distância Euclidiana do depósito à entrada das zonas A_1 , A_2 e A_3 (Figura 8) e $k \geq 1$ é um coeficiente corretivo da distância Euclidiana para auxiliar no ajuste aproximado da rede viária (NEWELL e DAGANZO, 1986; NOVAES, CURSI e GRACIOLLI, 2000).

O ajuste da distribuição da variável aleatória k (*route factor*), tem como resultado uma distribuição normal de média $E[k]=1.32$ e variância $Var[k]=0.12$ (NOVAES, FRAZZON e BURIN, 2009). Salienta-se que quando os pontos de atendimento dentro do distrito se distribuem de maneira aproximadamente uniforme e independente (distribuição espacial de Poisson), e as zonas são razoavelmente compactas e convexas (LARSON e ODoni, 2007), as distâncias reais entre pontos podem ser estimadas com razoável precisão através da multiplicação da distância teórica, calculada através da norma ℓ (distância Euclidiana), por uma constante corretiva previamente ajustada. (NOVAES, CURSI e GRACIOLLI, 2000)

Os tempos úteis nas faixas B e C devem ser estimados pelas expressões (7) e (8) respectivamente.

$$TU_B = H - \frac{2kr_A}{v} \quad (7)$$

$$TU_C = H - \frac{2kr_B}{v}. \quad (8)$$

Dado que o número de clientes cadastrados nos distritos da faixa A (nc_A) é um dado do problema e de posse dos tempos úteis em cada um dos distritos, pode-se determinar o número total de clientes cadastrados nas zonas das faixas B e C , os quais são representados por nc_B e nc_C , respectivamente, definidos por

$$nc_B = nc_A \frac{TU_B}{TU_A}, \quad (9)$$

$$nc_C = nc_B \frac{TU_C}{TUA}, \quad (10)$$

Dispondo-se dos valores de nc_A , nc_B e nc_C , calculam-se as áreas de cada zona, e para isso dividem-se os números de clientes cadastrados em cada distrito pela densidade δ . O valor de r_A pode ser calculado através da seguinte relação, definida pelas propriedades geométricas indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$S_A = \frac{\theta \pi (r_A^2 - r_0^2)}{360} = \frac{nc_A}{\delta} \text{ ou } r_A^2 = r_0^2 + \frac{360 nc_A}{\delta \pi \theta}, \quad (11)$$

onde, θ é o ângulo formado pelas faixas (Figura 8**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), expresso em graus. De forma análoga, r_B e r_C são expressos por

$$r_B^2 = r_A^2 + \frac{360 nc_B}{\delta \pi \theta} \quad (12)$$

$$r_C^2 = r_B^2 + \frac{360 nc_C}{\delta \pi \theta} \quad (13)$$

Dessa forma, ficam definidos os contornos dos nove distritos de modo a garantir condições equalizadas de serviço para os veículos a eles alocados, isto é, tempos de ciclo aproximadamente iguais, em valores médios.

Contudo, apresentados os procedimentos de equalização entre os distritos, complementarmente, definem-se os tempos de ciclo. Entende-se por tempo de ciclo TC_i , de um veículo alocado a um distrito i como a soma de todos os tempos que o veículo gasta desde sua saída do depósito até seu retorno. O valor esperado do TC_i é representado por $\overline{TC_i}$ sendo dado por

$$\overline{TC_i} \cong 2 \frac{kD_i}{v} + \frac{k n_{i-1} \bar{d}}{v} + n_i \bar{T}_s, \quad (14)$$

onde, n_i é o número de clientes a serem visitados, num certo dia, no distrito i , D_i é a distância Euclidiana entre o depósito e a zona i , v é a velocidade média, \bar{d} é a distância Euclidiana média entre dois clientes sucessivos atendidos no roteiro, e \bar{T}_s é o tempo médio de serviço ao atender um cliente.

Assim, o primeiro termo do lado direito da Equação (14), representa a soma dos tempos de ida e volta entre o depósito e o distrito i . O segundo termo está associado à soma dos tempos de percurso dentro da zona, ou seja, o tempo de deslocamento entre os clientes, e o terceiro termo representa a soma dos tempos de serviço em cada cliente.

Admite-se que as variáveis expressas na Equação (14) são aleatórias e independentes, onde se respeitada a condição $n_i \geq 15$, pelo teorema do limite central da Estatística pode-se afirmar que TC_i pode ser representado por uma distribuição normal.

A variância do TC_i é representada pela soma das variâncias dos termos representados na Equação (15).

$$Var[TC_i] = 2 Var\left[\frac{k D_i}{v}\right] + n_{i-1} Var\left[\frac{k d_i}{v}\right] + n_i Var[\bar{T}_s]. \quad (15)$$

5.2.2. PCV Estático

No PCV estático, cada veículo deixa o depósito com um roteiro pré-programado não sendo contempladas alterações durante o percurso. Todavia, quando não houver possibilidade de cumprir todas as tarefas pretendidas durante o dia, em decorrência do tempo de jornada de trabalho que não garantiu o tempo de ciclo, as tarefas serão transferidas para outro dia, ou seja, não serão atendidas naquele dia. Contudo, esse tipo de situação pode gerar atrasos ainda maiores, devido à sobrecarga de serviço que pode ocorrer, assim, podendo atrasar a tarefa por vários dias. Isso não seria um procedimento recomendado, por se tratar de uma condição de baixo nível de serviços logísticos, trazendo para a empresa que executa o serviço, tanto prejuízos financeiros quanto de confiabilidade. No presente trabalho a simulação estática foi

realizada com o objetivo de determinar o número de tarefas não cumpridas ao final da jornada diária de trabalho.

5.2.3. PCV dinâmico

O esquema de roteirização dinâmica analisado neste trabalho caracteriza-se pela eventual transferência de tarefas dos veículos regulares para um veículo auxiliar com sede no depósito, e que cobre todas as zonas da região atendida.

Antes, porém, de descrever o processo, deve-se saber que o parâmetro que espelha na simulação as condições de tráfego é a velocidade média de percurso. Deve-se considerar que ao sair do depósito, não se sabe ainda as condições de tráfego. Para isso, foram definidos dois cenários para um dia útil: (a) cenário H_0 , que corresponde a um dia de trabalho típico, com condição de tráfego padrão, e gerando uma velocidade média v_0 ; (b) cenário H_1 , que representa uma condição particularmente severa de tráfego, ocasionada por graves acidentes em artérias importantes, greve no sistema de transporte público, chuvas pesadas, alagamentos, etc., e gerando uma velocidade média $v_1 < v_0$.

Para melhor entendimento, considere que o cenário H_0 ocorra com probabilidade p_0 e o cenário H_1 com probabilidade $1 - p_0$ para cada cenário, uma vez que a velocidade v se altera, os valores de $\overline{TC_i}$ e $Var[TC_i]$ também se alteram. Uma vez que a variável TC_i é regida por uma distribuição normal (teorema do limite central), o valor máximo esperado TC_i^* , para nível de confiança de 98%, é dado por

$$TC_i^* = E[TC_i] + 2.06 \{var[TC_i]\}^{1/2} \quad (16)$$

Seja H o tempo máximo permitido para a jornada de trabalho da tripulação do veículo, descontados a hora de almoço, tempo para descanso, etc. A restrição (17) é imposta no modelo, Válida para todos os distritos que cobrem a região \mathfrak{R} .

$$TC_i^* \leq H, \quad i=1,2,\dots \quad (17)$$

Os valores da variância de $k D_i / v$ e da variância de T_s são estimados a partir de levantamento de campo direto. Já o valor da variância de $k d_i / v$ foi estimado através de simulação (NOVAES, FRAZZON e BURIN, 2009). Para simular valores de $k d_i$, separou-se a análise em duas etapas. Inicialmente foi ajustada a distribuição da variável aleatória k (*route factor*), em seguida, foi ajustada estatisticamente a distribuição de d_i , considerando, para isso, distâncias Euclidianas. Admitindo-se que os pontos (clientes) se distribuam no distrito de acordo com uma distribuição espacial de Poisson (NOVAES, FRAZZON e BURIN, 2009), mostrou-se que a variável d_i pode ser representada através de uma distribuição de Erlang, com parâmetro $\psi = 3$, e cuja função densidade de probabilidade é dada por

$$f(d_i) = \frac{\mu^\psi}{(\psi - 1)!} d_i^{\psi-1} e^{-\mu d_i} \quad (18)$$

, com $\psi = 1, 2, \dots, \infty$ e $\mu > 0, \quad d_i \geq 0$,

e onde

$$E[d_i] = \psi / \mu \quad \text{e} \quad \text{var}[d_i] = \psi / \mu^2. \quad (19)$$

Na simulação, gera-se um valor aleatório para a variável k , considerando para isso distribuição normal. Admitindo que os roteiros dentro dos distritos respeitem as condições Hamiltonianas definidas através do *PCV (Problema do Caixeiro Viajante)*, o valor esperado da distância Euclidiana entre dois clientes consecutivos é dado por (LARSON e ODoni, 2007)

$$E[d_i] \cong \frac{0.765 \sqrt{S_i n_i}}{n_i} = 0.765 \delta^{-1/2} \quad (20)$$

Entrando com o valor de $E[d_i]$ e $\psi = 3$ em (19), calcula-se μ , permitindo assim, simular no computador, valores de d_i , segundo a distribuição de Erlang (18). Finalmente, o valor simulado de $k d_i$ é obtido através da multiplicação dos valores simulados de k e de d_i .

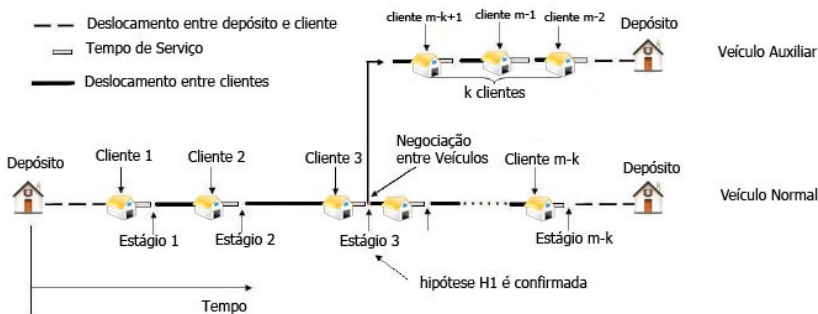
De posse desses conceitos, o processo pode ser entendido da seguinte maneira: inicialmente, deve-se considerar que numa aplicação real, desde o momento em que o veículo deixa o depósito, o setor de controle, situado no depósito, fica levantando informações gerais sobre as condições de tráfego. Caracterizada a ocorrência do cenário H_1 , num determinado instante, algumas providências são tomadas. Para isso, o computador de bordo, instalado em cada veículo, registra os instantes de parada em cada cliente, como também o tempo de liberação do veículo, partindo para sua próxima visita, sendo essas informações transmitidas ao computador central do depósito.

Uma vez definido o cenário H_1 , um processo de simulação é disparado buscando verificar se os clientes alocados para o roteiro e que ainda não foram visitados, poderão serem atendidos, respeitando o tempo da jornada diária de trabalho. Caso haja transferência, ou seja, verifica-se que algumas tarefas não poderão ser atendidas, torna-se necessário definir quais tarefas deverão ser repassadas para o veículo auxiliar.

O procedimento descrito pode ser visualizado na Figura 9. Nesta, no estágio 3, é confirmada a hipótese H_1 e, detectada a necessidade de transferência onde k clientes são transferidos para um veículo auxiliar.

Salienta-se que no processo de simulação uma análise sequencial é realizada para testar a hipótese. Essa análise sequencial será tratada com maiores detalhes.

Figura 9- A rota sequencial do veículo e a estratégia de decisão



Fonte: (NOVAES, FRAZZON e BURIN, 2009)

No caso trabalhado neste projeto, a área de estudo é dividida em nove zonas tendo um veículo alocado para cada uma delas. Os testes de hipótese são realizados após o atendimento de cada um dos clientes. Assim, não se sabe a priori qual zona irá transferir primeiro e nem a ordem em que essas transferências acontecem. Com isso, para que se possam alocar os clientes ao roteiro do veículo auxiliar foi utilizado um algoritmo genético cuja modelagem será descrita mais adiante.

Em seguida, o veículo regular segue sua rota para atender o restante de suas tarefas, e o veículo auxiliar começa a executar as tarefas que foram transferidas para ele.

Os retornos, ou seja, as atividades não cumpridas podem ocorrer mesmo após a transferência de clientes para o veículo auxiliar sendo que o mesmo pode ocorrer com o veículo auxiliar.

5.2.4. Análise Sequencial

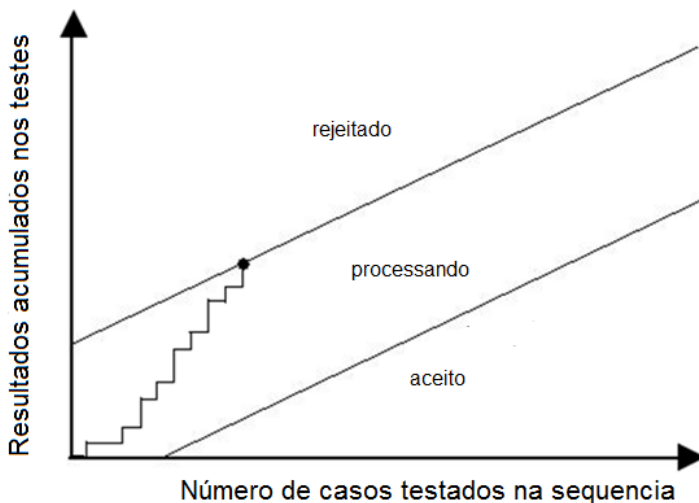
A variabilidade do fluxo de tráfego no dia-a-dia em redes urbanas produz padrões típicos de tráfego. Entretanto, ocasionalmente, eventos inesperados causam picos de volumes que sobrecarregam o sistema viário. Tais eventos são gerados por vários motivos, como graves acidentes, greves nos transportes públicos, tempestades de longa duração, entre outros.

A principal dificuldade na detecção de uma ocorrência por intermédio da observação de algumas propriedades do sistema viário, está em separar o que é considerado ruído do que é considerado um fator relevante. Além disso, algumas falhas são de natureza catastrófica, levando a uma mudança abrupta nas variáveis de controle. Contudo algumas falhas ocorrem com modificações graduais ao longo do tempo, e muitas vezes são representadas por mudanças aditivas no modelo estocástico correspondente. Uma forma de tratar este tipo de problema é a Análise Sequencial. (WALD, 1947; LAI, 2001; BASSEVILLE e NIKIFOROV, 1993)

Técnicas clássicas de inferência estatística e testes de hipóteses adotam um tamanho de amostra fixa. Com este tipo de abordagem, procura-se minimizar as probabilidades de erro para um dado tamanho de amostra. O tamanho da amostra é definido de antemão, e na sequência da análise estatística, uma das duas ações possíveis é realizada: aceitar a hipótese nula H_0 , ou aceitar a hipótese alternativa H_1 . A hipótese nula representa em nossa análise a situação padrão ou básica, enquanto a hipótese alternativa indica a ocorrência de uma condição anormal. Outra maneira de resolver o problema de testar hipóteses é quando o tamanho da amostra não é fixado a priori, mas depende dos dados que já foram observados.

Nesse caso a Análise Sequencial é indicada. Nesse momento, suponha o seguinte: para um dado erro probabilístico, tente minimizar o tamanho da amostra, ou equivalentemente, tome a decisão com tão poucas observações quanto possível. Contrariamente, na abordagem para um tamanho de amostra fixo, uma terceira forma possível pode ocorrer na análise sequencial quando a evidência é ambígua: tomar mais observações até a evidência favorecer fortemente uma das duas hipóteses. Assim, a análise sequencial segue uma sequência dinâmica de observações de tal forma que a decisão de terminar ou não o experimento depende, em cada etapa, dos resultados do teste anterior. Para melhor compreensão basta visualizar a Figura 10, em que a região compreendida entre as duas retas (paralelas) corresponde à decisão de prosseguir no teste. A cada estágio a análise é realizada e o processo termina quando num determinado estágio o ponto de análise estiver sobre uma das retas ou nas regiões de aceitação ou rejeição.

Figura 10- Representação da funcionalidade da Análise Sequencial



Fonte: adaptado de (NOVAES, 1968)

Embora alguns autores atribuam o pioneirismo da análise sequencial às obras de Huyghens, Bernoulli e Laplace, ela nasceu efetivamente em resposta à demanda de testes mais eficientes de artilharia antiaérea, durante a Segunda Guerra Mundial, culminando com o desenvolvimento da Sequential Probability Ratio Test (SPRT) ou teste sequencial da relação de probabilidade por Wald, em 1943 (LAI, 2001). Um caso típico de estimação sequencial surge quando somente um parâmetro desconhecido μ é requerido para definir a distribuição da variável aleatória x , objeto de análise.

Dado $f(x, \mu)$ como a função de densidade probabilidade de x , com x contínua.

Reciprocamente, se x é discreto, $f(x, \mu)$ representa essa probabilidade. Dados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$, sendo o conjunto de m observações sequenciais e independentes em x . Por causa dessa independência das observações, a função de densidade de probabilidade conjunta é dada por

$$f(x_1, \mu)f(x_2, \mu) \dots f(x_m, \mu) \quad (21)$$

Supõe-se então que, se deseja testar a hipótese simples que $\mu = \mu_0$. Esta é a hipótese nula denotada por H_0 . A hipótese alternativa $\mu = \mu_1$ será denotada por H_1 . Assim, vamos lidar com o problema de testar a hipótese simples H_0 contra a hipótese simples alternativa H_1 , com base em uma amostra de m observações independentes x_1, x_2, \dots, x_m de x . De acordo com Neyman e Pearson, erros de dois tipos estão presentes quando se aceita ou rejeita a hipótese H_0 . Cometemos um erro do primeiro tipo, se rejeitamos H_0 quando ela é verdadeira. Por outro lado, comete-se um erro do segundo tipo se for aceita H_0 quando H_1 é verdadeiro. Denota-se a probabilidade de um erro do primeiro tipo por α , e uma probabilidade de um erro de segundo tipo por β .

Para aplicar o teste sequencial da relação de probabilidade desenvolvido por Wald (1947) para testar $H_0 : \mu = \mu_0$ contra $H_1 : \mu = \mu_1$, duas constantes positivas A e B ($B < A$) são calculadas por

$$A = \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (22)$$

$$B = \frac{\beta}{1 - \alpha} \quad (23)$$

Supõe-se uma retirada de m amostras, levando a observações independentes x_1, x_2, \dots, x_m sobre a variável aleatória x . Nesta fase do experimento, o SPRT (WALD, 1947; LAI, 2001; BASSEVILLE e NIKIFOROV, 1993) é calculado por

$$\pi_m = \frac{f(x_1, \mu_1)f(x_2, \mu_1) \dots f(x_m, \mu_1)}{f(x_1, \mu_0)f(x_2, \mu_0) \dots f(x_m, \mu_0)} \quad (24)$$

Assim, três situações podem ocorrer:

Se $B < \pi_m < A$, o experimento continua e é adicionada mais uma observação;

Se $\pi_m \geq A$, o experimento termina com a rejeição de H_0 ;

Se $\pi_m \leq B$, o experimento termina com a aceitação de H_0 .

Para fins de simplificação matemática é mais conveniente calcular o logaritmo do quociente de π_m . Dado

$$z_i = \ln \left(\frac{f(x_i, \mu_1)}{f(x_i, \mu_0)} \right) \quad (25)$$

Define-se então,

$$\pi_m^* = \ln(\pi_m) = z_1 + z_2 + \dots + z_m \quad (26)$$

O teste passa a ser aditivo. O experimento continua se $\ln B < \pi_m^* < \ln A$ pela adição de uma nova observação; o processo termina com a rejeição de H_0 se $\pi_m^* \geq \ln A$; e ele termina com a aceitação de H_0 se $\pi_m^* \leq \ln B$.

5.2.5. Modelagem do AG para o veículo auxiliar

O veículo auxiliar é um componente de fundamental importância no modelo adotado, pois é ele que irá realizar o atendimento dos clientes que deixaram de ser atendidos pelos veículos regulares, fazendo com que os índices de clientes não atendidos diminuam.

O princípio básico de um algoritmo genético é manter uma população de indivíduos (cromossomos) que evolui e se modifica por meio de recombinações desses indivíduos e de mutações, aplicadas a certa parcela dessa população, ocasionadas por pequenas alterações do meio. Como, de acordo com a teoria Darwiniana, os indivíduos mais aptos sobrevivem, utiliza-se uma função de aptidão ou avaliação, responsável pela classificação dos indivíduos e pelo grau de sua aptidão.

No Problema de Roteamento Dinâmico de Veículos (PRVD) o cromossomo representa os clientes a serem visitados. Ribeiro e Lorena (2005) utilizaram algoritmos genéticos para tratar o PRVDJT e consideraram o cromossomo como um conjunto de rotas. Neste trabalho, o cromossomo trata uma única rota supondo a utilização de um único caminho.

Supondo-se então, que c_i represente os clientes transferidos de um ou mais distritos. A Figura 11 representa a sequencia de clientes no roteiro auxiliar.

Figura 11- Rota auxiliar (cromossomo)

c_5	c_6	c_1	c_4	c_3	c_2	c_7
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

Durante o processo de roteamento, o cromossomo sofre alterações, à medida que novas transferências são solicitadas. Com isso, novos clientes são inseridos na estrutura e clientes que já foram visitados, são removidos do cromossomo. A cada alteração da estrutura do cromossomo, uma reprogramação da rota é executada, ou seja, é feita uma nova chamada do algoritmo genético na busca da melhoria rota.

No valor do fitness, utilizado para avaliar a qualidade da rota, é considerado o custo decorrido desde a saída do caminhão do depósito, o custo da rota definida pelo cromossomo e o custo de deslocamento do último cliente do roteiro até o depósito. O valor do fitness é dado pela expressão,

$$f = \tau_{H1} + \sum_{i=1}^{q-1} \tau_{i,i+1} + \tau_{H2} \quad (27)$$

onde, q é o número de clientes no cromossomo, τ_{H1} é o tempo de percurso do veículo auxiliar desde o depósito até o primeiro cliente; τ_{H2} é o tempo decorrido desde a última visita ao depósito e $\sum_{i=1}^{q-1} \tau_{i,i+1}$ é a soma dos tempos de deslocamento entre um cliente i e seu sucessor $i+1$. É importante salientar que os tempos de atendimentos aos clientes T_s , não são computados, pois, dado um valor de q , a soma desses tempos é constante e não influencia na minimização de f .

Considera-se como restrição do problema a carga horária de trabalho. Caso essa restrição seja violada os clientes transferidos são retirados um de cada vez do cromossomo e uma nova rodada do algoritmo é realizada até o momento em que a solução volte a ser factível.

No processo evolutivo do algoritmo genético a partir de uma população de N cromossomos, cada nova geração é definida por meio de operadores genéticos denominados de cruzamento e mutação.

Dentre os procedimentos de cruzamento existentes na literatura, pode-se destacar o PMX (Partially Matched Crossover), OX (Order Crossover) e o CX (Cycle Crossover), este último utilizado neste trabalho.

O procedimento que descreve esse operador pode ser entendido da seguinte maneira:

Suponha o seguinte par (Figura 12),

Figura 12- Dupla de pais para o algoritmo genético

Pai 1

c ₅	c ₆	c ₁	c ₄	c ₃	c ₂	c ₇
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Pai 2

c ₃	c ₅	c ₄	c ₇	c ₂	c ₆	c ₁
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

Para definição do Filho 1, inicia-se o processo copiando o primeiro elemento do Pai 1 (no caso o c₅) para a primeira posição do Filho 1, em seguida verifica-se o elemento correspondente ao Pai 2 e se realiza a cópia desse elemento na posição correspondente no Pai 1 (neste caso o c₃). O processo continua até que o elemento correspondente no Pai 2 já tenha sido copiado para o Filho 1. No exemplo em questão, esse processo é finalizado no momento em que encontra o c₅ no Pai 2. Após essa etapa, os espaços em branco são preenchidos com os elementos de Pai 2 das posições correspondentes. O mesmo processo é executado para geração do Filho 2, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13- Dupla de filhos gerados pelo algoritmo genético

Filho 1

c ₅	c ₆	c ₄	c ₇	c ₃	c ₂	c ₁
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Filho 2

c ₃	c ₅	c ₁	c ₄	c ₂	c ₆	c ₇
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

O operador de mutação é responsável pela manutenção da diversidade da população de indivíduos. O processo definido neste

trabalho foi a simples troca de dois elementos do cromossomo conforme Figura 14:

Figura 14- Geração do cromossomo

Antes

c ₅	c ₆	c₄	c ₇	c₃	c ₂	c ₁
----------------	----------------	----------------------	----------------	----------------------	----------------	----------------

Depois

c ₅	c ₆	c₃	c ₇	c₄	c ₂	c ₁
----------------	----------------	----------------------	----------------	----------------------	----------------	----------------

Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

A cada processo de troca verificações são realizadas para determinar se o cromossomo gerado apresenta melhores resultados do que o último cromossomo selecionado.

5.3. PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

Para validar o modelo dinâmico proposto, foi necessário o desenvolvimento de um sistema computacional, que gerasse a simulação dos dois ambientes, estático e dinâmico, com o intuito de realizar uma comparação entre os resultados. Seguindo este conceito, muitos esforços foram investidos neste projeto, o qual foi devidamente finalizado e utilizado para o fim proposto.

Como o intuito era a realização de simulações, necessárias para validar o modelo, procurou-se não dar ênfase na parte visual do sistema, mas sim nos procedimentos para geração de informações, objetivando a geração de resultados que fossem de fundamental importância na comparação e análise do problema.

Por ser um sistema com o intuito acadêmico, foram utilizadas ferramentas gratuitas para seu desenvolvimento. Sendo assim, foi escolhida como linguagem de programação o Java 6, para ser utilizada na codificação do simulador. Esta linguagem é muito bem conceituada, estável e com uma gama de recursos. Como editor da linguagem foi escolhido o Netbeans 6.9, ferramenta que é bastante sofisticada e consegue auxiliar o programador em seu desenvolvimento.

Para o armazenamento das informações, foi utilizado como banco de dados o Mysql 5.1. Este banco de dados é considerado como um dos bancos mais rápidos disponíveis atualmente no mercado, o que se confirmou durante o processo de simulação, devido o número muito

grande de requisições por segundo que era submetido e conseguindo manter-se estável durante toda a simulação. Para o interfaceamento da conexão entre o sistema e o banco de dados, foi utilizado o JDBC, com uma biblioteca disponível no fabricante deste banco.

As simulações geradas através deste sistema foram finalizadas de maneira muito rápida, possibilitando que fossem feitos inúmeros processos para comparação dos dados.

O sistema foi projetado em plataforma Desktop, ou seja, para rodar não é necessária a montagem de servidores de aplicação.

A modelagem de dados do sistema e os códigos fontes estão disponíveis como anexo deste trabalho, e as telas do sistema podem ser vistas nas Figura 15 e Figura 16.

Figura 15- Tela do sistema de simulação

Visualização do desenho [TelaPrincipal]

Roteirização Dinâmica de Veículos

Informações I Informações II

Cliente Inicial:	45	Jornada Trabalho:	8
Cliente Final:	45	Índice Variável:	0.12
Num. Area X:	3	Índice K:	15
Num. Area Y:	3	Índice MI:	1.32
Densidade:	0.75	Probabilidade Velocidade:	0.70
Velocidade:	30	Tempo Médio Serviço:	12
Itens:	1		

Pronto para começar...

Gerar Limpar Banco

Fonte: próprio autor

Figura 16- Tela do sistema de simulação II

Visualização do desenho [TelaPrincipal]

Roteirização Dinâmica de Veículos

Informações I Informações II

Vel. sem Trânsito:	30	Alfa - Análise Seq.:	0.005
Vel. com Trânsito:	20	Beta - Análise Seq.:	0.005
Probabilidade Inicial:	0.0	Índice Th:	3
Probabilidade Final:	0.7	Índice Tu:	3
Vel. Inicial:	30		
Raio Inicial:	6		

Pronto para começar...

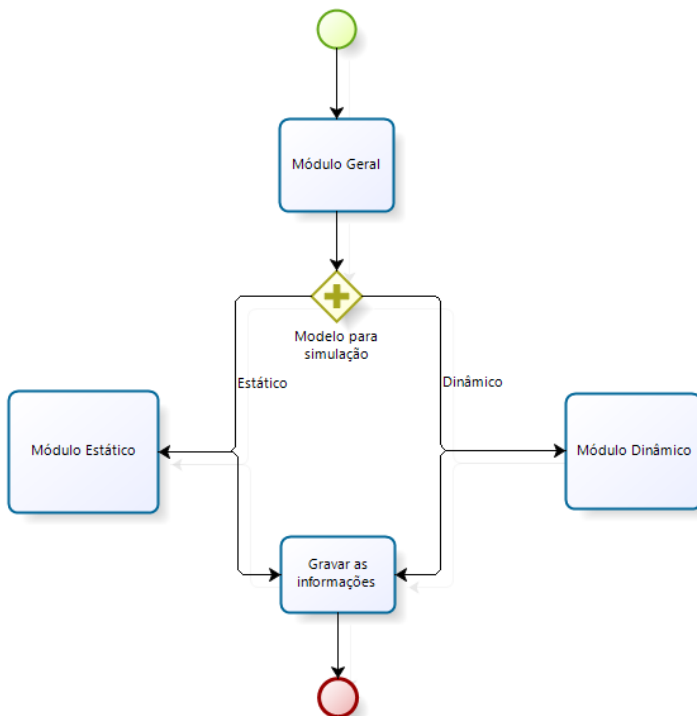
Gerar Limpar Banco

Fonte: próprio autor

O sistema foi subdividido em três módulos, onde se idealizou um dos módulos como sendo a base do sistema, gerando rotinas e retornando resultados comuns para alimentar os demais. Os demais módulos foram divididos pelo tipo de simulação, no caso estático e dinâmico.

O primeiro módulo, o qual neste trabalho foi denominado de Módulo Geral, é formado por procedimentos e funcionalidades focados na metodologia comum entre os outros dois modelos propostos, ou seja, para uma simulação em qualquer um dos outros dois módulos (estático ou dinâmico) deverá ser sempre utilizado o módulo Geral. O segundo módulo foi desenvolvido focando na parte estática da simulação, e o terceiro módulo foi voltado à parte dinâmica. O esquema está representado na Figura 17 e será detalhado posteriormente.

Figura 17-Illustração da subdivisão do sistema de simulação



Fonte: próprio autor

5.3.1. Módulo Geral

O desenvolvimento do Módulo Geral foi estruturado seguindo uma lógica definida pelo modelo proposto. Primeiramente são feitas as leituras das variáveis de entrada, onde o sistema apresenta ao usuário todos os campos de variáveis já preenchidos com um valor padrão, porém, permitindo a edição destes campos pelo mesmo.

Assim, o sistema inicializa realizando uma leitura dos dados e de todas as variáveis que serão utilizadas, onde boa parte delas é calculada durante o processo, por serem variáveis aleatórias, ou mesmo dependente de outros valores obtidos em fases de processamento anteriores.

Posteriormente são realizados procedimentos para a montagem do cenário inicial do problema onde deverão ser realizadas as simulações. Consequentemente, são calculados os raios, as áreas dos distritos, os tempos de percurso entre o distrito e o depósito e vice-versa, o tempo útil de percurso que o veículo terá no distrito e o número de clientes por distrito.

Com o cenário já montado, é realizada a geração dos clientes nas zonas, através de uma distribuição aleatória, conforme a distribuição de Poisson, dentro dos padrões estabelecidos para a aplicação, fazendo com que todos os distritos sejam populados, respeitando as condicionantes pré-estabelecidas no modelo.

O número de clientes utilizados é atribuído aos distritos da faixa A, sendo que o valor dos clientes é um parâmetro de entrada do sistema. Com a definição desse número de clientes que farão parte dessa faixa, o sistema irá realizar uma seleção para determinado dia de serviço, simulando uma solicitação de serviço de um determinado cliente. Este cálculo será feito de forma aleatória, utilizando uma probabilidade p definida, respeitando a condição de que para uma determinada faixa, o número de clientes em seus distritos deverá ser igual. Com a conclusão dessa etapa, esses valores são utilizados para determinar o número de clientes das demais zonas das faixas B e C, através de (9) e (10), como também os raios r_A, r_B, r_C , através de (11), (12) e (13), entre outros.

Com isso, é feita a definição da matriz de distância entre os clientes selecionados e o depósito. Esta matriz irá conter as informações referentes às distâncias entre os clientes do mesmo distrito. Por se tratar

de um problema simétrico, a distância entre o cliente 1 para o cliente 2 é o mesmo que o do cliente 2 para o cliente 1.

Após este processo será atribuído a cada veículo, o roteiro que deverá ser atendido, chamado de rota inicial. Esta rota será feita utilizando duas heurísticas, conforme já mencionado.

Inicialmente será utilizada a heurística construtiva para gerar o roteiro inicial, onde foi adotada para este trabalho a Inserção do Mais Distante, fazendo com que cada veículo possua o roteiro que irá atender.

Com o objetivo de melhorar este roteiro, foi adotada uma heurística de melhoramento, a qual foi escolhida a 3-opt. A escolha desta heurística não foi apenas baseada na literatura, mas sim, em testes realizados entre o 2-opt e o 3-opt, com o intuito de se ter subsídios concretos na escolha, o qual confirmou a afirmação de Rodrigues (2000), onde os testes realizados apontaram o 3-opt como uma melhor solução em comparação com o 2-opt.

O Módulo Geral é a base dos demais, processando e encontrando as informações necessárias para montagem do cenário a ser abordado pelos outros módulos. Conforme representado na Figura 17, após a execução das rotinas atribuídas a este módulo, os módulos estáticos e dinâmicos serão executados, porém, com o desacoplamento que foi projetado o sistema, pode-se realizar chamadas de apenas um dos módulos, ou no caso deste trabalho fazer a chamada dos dois módulos, para se obter os resultados desejados.

5.3.2. Módulo estático

O módulo estático foi projetado, herdando o roteiro inicial do módulo geral e simulando um processo de coleta nos clientes, realizando este processo até que todos tenham sido atendidos ou que o tempo máximo da jornada de trabalho tenha se esgotado.

Quando o veículo não conseguir atender todos os clientes, o sistema irá armazenar os que não puderam ser atendidos, classificando-os como retorno.

Neste módulo será utilizada a hipótese H0 ou a hipótese H1(simulando mudança no tráfego), em cada visita realizada, sendo estas hipóteses escolhidas aleatoriamente, com probabilidade de aceite estabelecida pelo usuário. Porém, esta informação não será conhecida

antecipadamente pelo veículo, sendo utilizada apenas nos cálculos de deslocamento, com isso a simulação será mais realista para este tipo de solução adotada. A velocidade média que o veículo irá percorrer é dada por uma probabilidade aleatória, também estabelecida pelo usuário.

Assim, serão realizados os cálculos do tempo de deslocamento do veículo entre todos os clientes pertencentes ao roteiro. Para cada visita em um determinado cliente, é executado um procedimento que irá fazer o cálculo da distância percorrida no trajeto e a velocidade média adotada, com isso se tem o tempo que o veículo levou para completar o trajeto.

Outro cálculo realizado no processo de simulação é determinar o tempo de serviço que cada veículo irá gastar em sua execução da tarefa. Como neste caso é feito via simulação, adotou-se o tempo médio de serviço de 12 minutos, onde para cada ponto a ser visitado este tempo varia aleatoriamente, porém respeitando de forma global a definição da média adotada.

Todavia, irá ser obtido o tempo de ciclo de cada veículo, ou seja, após cada visita realizada pelo veículo, é realizada a verificação do tempo que foi gasto pelo veículo até aquele determinado momento. Neste cálculo inclui o tempo de deslocamento do depósito até o primeiro cliente a ser visitado, a somatória de todos os tempos de deslocamento até então realizados, a somatória do tempo de serviço gasto pelo veículo em cada um dos pontos e o deslocamento do próximo cliente a ser visitado até o depósito.

Assim, pode-se determinar se ainda é possível o veículo realizar mais uma tarefa, ou se o mesmo deverá retornar ao depósito imediatamente, já que o sistema deverá obedecer à restrição da jornada de trabalho da tripulação do veículo. Isso significa que após cada uma das visitas realizadas pelo veículo, é verificado se o mesmo tem possibilidade de realizar uma nova visita sem desrespeitar a restrição da jornada de trabalho. Caso não se possa realizar novas visitas, o módulo será finalizado e os clientes que ainda não foram visitados serão armazenados como retorno.

Todas as informações relevantes no sistema serão armazenadas em um banco de dados durante o processo, para então fazer uma avaliação mais detalhada no final da simulação. Os dados armazenados envolvem a rota inicial e rota final, tempo de ciclo,

clientes que foram retornados, clientes atendidos pelo veículo, distância do percurso, entre outros.

Na simulação utilizando este módulo, o objetivo é estimar a quantidade de tarefas que não conseguiram ser cumpridas no final da jornada de trabalho. O algoritmo que representa este processo está representado conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Simulação da configuração estática

- 1) $i = 0$;
- 2) $i = i + 1$ (i é o n° do distrito)
- 3) gerar valor aleatório $0 \leq \varepsilon \leq 1$;
- 4) se $\varepsilon \leq p_0$, $v = v_0$;
- 5) se $\varepsilon > p_0$, $v = v_1$;
- 6) gerar valor para k por meio de distribuição normal
- 7) gerar valor para $D_i^{(I)}$ (distância do depósito à zona) por meio de distribuição normal;
- 8) calcular o valor $\tau_1 = k D_i^{(I)} / v$ (tempo entre o depósito e o primeiro cliente do roteiro)
- 9) repetir de (3) a (5), gerando $\tau_2 = k D_i^{(II)} / v$ (tempo de retorno desde o último cliente visitado até o depósito)
- 10) $T = \tau_1 + \tau_2$
- 11) Para $j = 1$ até $j = n_i$
 - a) simular valor de k , de acordo com a normal, e de d_i , de acordo com distribuição de Erlang;
 - b) gerar valor simulado de $k d_i / v$;
 - c) simular valor de T_s , de acordo com distribuição normal;
 - d) $x = T + k d_i / v + T_s$
 - e) Se $x < H$ então $T = x$;
 - f) caso $x \geq H$ então $n_i^{(R)} = n_i - j$, o tempo de ciclo é $T_i = T$ e vá para (12)
- 12) se i menor do que o n° de distritos, vá para (2); senão termine

Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

O desenvolvimento desse módulo busca a geração de resultados para se conseguir fazer uma comparação entre o modelo estático e o modelo dinâmico, como já mencionado. As informações geradas e então armazenadas servem como uma base coerente para este fim.

5.3.3. Módulo Dinâmico

O módulo dinâmico foi projetado para capturar a rota inicial construída pelo Módulo Geral, e simular coletas nos clientes até que todos tenham sido atendidos ou o tempo máximo da jornada de trabalho tenha se esgotado. Diferentemente do módulo estático, quando o veículo prevê que não irá atender todos os clientes, devido às condições severas de tráfego, o mesmo irá fazer uma verificação da possibilidade de realizar a transferência de alguns de seus clientes para um veículo auxiliar.

Depois de realizada a verificação será determinado quais clientes devem ser transferidos, sendo que só poderão ser selecionados neste caso os clientes que ainda não foram atendidos pelo veículo regular. Sendo assim, foram adotados dois métodos para fazer os testes. O primeiro método é mais focado na otimização dos roteiros dos veículos regulares, enquanto o segundo procura focar nos veículos auxiliares.

Para o primeiro método adotado, as tarefas que devem ser transferidas para o veículo auxiliar são as últimas tarefas do roteiro do veículo regular. Para isso, aplica-se um algoritmo sobre as $n_i - m_i$ tarefas ainda não realizadas, buscando uma alternativa que minimize o tempo total de percurso T_i .

Já para o segundo método, é realizado um cálculo para determinar o centro de massa referente a todos os clientes a serem visitados em todos os distritos, sendo assim, são selecionadas os clientes que estejam mais próximas do centro de massa dos pontos, isso porque o veículo auxiliar tende a percorrer todos os distritos, fazendo com que seu roteiro seja minimizado.

Em ambos os métodos, as tarefas que são inseridas para o roteiro do veículo auxiliar vão formando diversas solicitações dinâmicas ao longo do tempo. Contudo, é necessário utilizar uma estratégia de

roteirização dinâmica no momento em que o veículo auxiliar for recebendo as transferências.

Quando o veículo sair do depósito central, imediatamente após a primeira transferência ser confirmada, o mesmo não tem informações do cenário a ser encontrado, se com trânsito seguindo normalmente ou se em condição considerada severa, assim utilizada para identificar essas condições H_0 e H_1 , respectivamente. Ao receber as informações de quais clientes irão fazer parte do roteiro auxiliar, o sistema irá efetuar o roteamento, gerado por um algoritmo genético. Cada vez que um veículo regular transferir clientes para o veículo auxiliar, o sistema irá adicionar esses clientes ao roteiro auxiliar e efetuará um novo processo de roteirização, descartando aqueles clientes que já foram visitados pelo veículo auxiliar.

Os clientes que não puderem ser atendidos pelo veículo regular e pelo veículo auxiliar são contabilizados como tarefas não cumpridas no dia, denominada retorno.

Neste módulo, diferentemente do módulo estático, o sistema irá utilizar a análise sequencial após cada visita nos clientes, para verificar quais das hipóteses estão sendo aceitas, H_0 ou H_1 , no intuito de diagnosticar se as condições do trânsito não se alteraram no decorrer do processo. A análise sequencial irá analisar questões de tráfego durante o percurso, fazendo com que haja uma verificação da necessidade de transferência ou não das tarefas. Esse processo se dará até que a hipótese H_0 seja verdadeira. Caso haja mudança de hipótese, ou seja, uma vez aceita a hipótese H_1 , o sistema não fará mais este procedimento de verificação, pois o cenário não poderá ser mais alterado para H_0 . Consequentemente, essa mudança faz com que o procedimento de verificação de transferência será executado, com o intuito de tentar detectar, neste cenário de tráfego intenso, quantos clientes poderão ser atendidos pelo veículo regular e quantos deverão ser transferidos para o veículo auxiliar.

Havendo necessidade de transferência de clientes, esta será realizada de duas formas, conforme mencionado, simulando a transferência dos últimos clientes da rota do veículo regular, como também simulando a transferência dos clientes que estiverem mais próximos de um centro de massa.

É importante salientar que após a transferência das tarefas para o veículo auxiliar, o veículo regular continuará executando sua rota normalmente, realizando visitas aos clientes restantes.

A cada atribuição de clientes para o veículo auxiliar, o sistema faz a varredura daqueles clientes que já foram visitados e os retira do roteiro, para que o algoritmo genético não faça a rota desses pontos novamente, evitando assim uma discrepância.

Ainda, serão realizados os cálculos do tempo de deslocamento do veículo entre todos os clientes pertencentes ao roteiro. Para cada visita em um determinado cliente, é executado um procedimento que irá fazer o cálculo da distância percorrida no trajeto e a velocidade média adotada, assim se tem o tempo que o veículo levou para completar o trajeto.

Outro cálculo importante para o processo de simulação é terminar o tempo de serviço que cada veículo irá gastar em sua execução da tarefa. Como neste caso é feito via simulação, adotou-se o tempo médio de serviço de 12 minutos, sendo que para cada um dos clientes visitados há uma variação de tempo de forma aleatória, porém respeitando de uma forma global a definição da média adotada.

Após cada visita realizada pelos veículos, irá ser obtido o tempo de ciclo, ou seja, é realizada a verificação do tempo que foi gasto pelo veículo até aquele determinado momento, para garantir que as restrições sejam respeitadas.

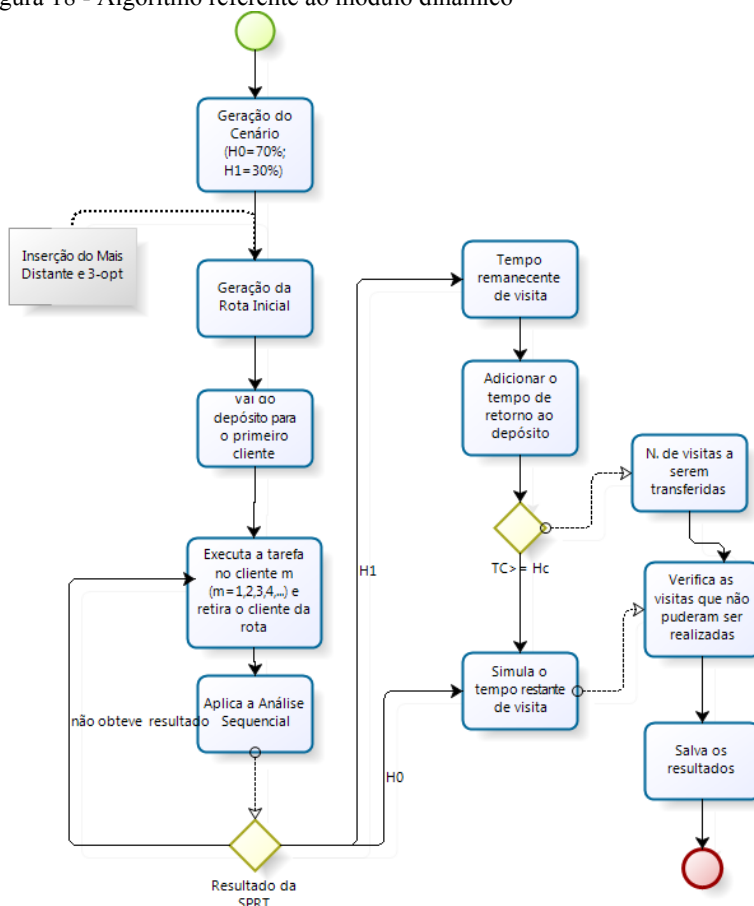
A Tabela 5 e a Figura 18 representam o algoritmo e o esquema lógicos, utilizado neste módulo, sendo que na Tabela 5 foram utilizadas as variáveis m_i para representar o número de clientes já visitados no distrito i , T' para o tempo útil restante (descontado tempo de retorno ao depósito) e $n_i^{(T)}$ para o número de tarefas a serem transferidas para o veículo auxiliar.

Tabela 5- Tarefas transferidas para veículo auxiliar

- (1) $i = 0$
- (2) $i = i + 1$ (i é o nº do distrito)
- (3) a velocidade é conhecida com probabilidade 1: $v = v_i$
- (4) gerar valor para k por meio de distribuição normal
- (5) gerar valor para $D_i^{(II)}$ (distância da zona ao depósito) por meio de distribuição normal; calcular o valor $\tau_2 = k D_i^{(II)} / v$ (tempo de retorno desde último cliente visitado até o depósito)
- (6) $T = \tau_2$
- (7) Para $j = m_i$ até $j = n_i$
 - (i) simular valor de k , de acordo com a normal, e de d_i , de acordo com distribuição de Erlang; gerar valor simulado de $k d_i / v$;
 - (ii) simular valor de T_s , de acordo com distribuição normal;
 - (iii) $x = T + k d_i / v + T_s$
 - (iv) Se $x < T'$ então $T = x$;
 - (v) caso $x \geq T'$ então $n_i^{(T)} = n_i - m_i - j$, o tempo de ciclo é $T_i = T$ e vá para (2)
- (8) se i menor do que o nº de distritos, vá para (2); caso contrário termine

Fonte: (NOVAES, BURIN, *et al.*, 2010)

Figura 18 - Algoritmo referente ao módulo dinâmico



Fonte: próprio autor

Após o processamento deste módulo, todas as informações relevantes no sistema serão armazenadas em um banco de dados para ser realizada uma avaliação mais detalhada no final da simulação. Diferentemente do módulo estático, serão armazenadas também informações referentes aos dois tipos de transferências executadas durante o processo, para que se possa fazer uma avaliação e comparação entre ambas.

5.3.4. Valores de entrada

Para a geração dos resultados, foram realizadas 1.000 simulações, para cada número de clientes testados, o qual teve variação de 28 a 40 clientes, ou seja, foram realizadas 13.000 execuções do sistema, onde para cada chamada são feitas nove simulações uma para cada distrito, isso para cada modelo (estático e dinâmico). De forma simplificada o número de simulações é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Número de simulações executadas

Descrição		Valor
Chamadas ao sistema		1.000
Modelos utilizados ¹	X	3
Faixa de clientes utilizados	X	13
Número de distritos	X	9
Subtotal de simulações	=	351.000
Simulação com veículo auxiliar (aproximadamente)	+	26.000
Total de simulações	=	377.000

Fonte: próprio autor

Para que os valores médios das amostragens convergissem, buscou-se trabalhar com a quantidade de 1000 simulações, onde para isso foram realizados inúmeros experimentos.

Após o final de cada simulação as informações são armazenadas em banco de dados. Com isso, ao término do processo, são geradas as médias das informações necessárias para avaliação e geração dos resultados de comparação. Outro ponto importante desse processo é que pode ser avaliada individualmente cada uma das informações.

Os valores dos parâmetros utilizados nestas simulações são encontrados de duas formas durante a simulação. Ou são dados de entrada, definidos pelo usuário do sistema ou são calculados internamente conforme as formulações de cada procedimento. São esses parâmetros de entrada que dão subsídios para que as fórmulas possam ser calculadas, e definir os resultados das simulações.

¹ Os modelos utilizados foram: Estático, Dinâmico sem Centro de Massa e Dinâmico com Centro de Massa.

A Tabela 7 traz o valor dos dados de entrada da simulação realizada.

Tabela 7 - Variáveis de entrada do sistema de simulação

Variável	Descrição	Valor
θ	Ângulo formado pelas faixas A, B e C	15°
r_0	Distância Euclidiana do depósito à entrada das zonas A_1 , A_2 e A_3	6 km
δ	Densidade de clientes por km^2	0.75 clientes / km^2
v_0	Velocidade média sem congestionamento de tráfego	30 km/h
v_1	Velocidade média com congestionamento de tráfego	20 km/h
$E[T_s]$	Média do tempo de serviço do veículo no cliente	12 min
$Var[T_s]$	Variância do tempo de serviço do veículo	$[0.5 \times T]^2$
α	Probabilidade de erro de H_0	0.005
β	Probabilidade de erro de H_1	0.005
Geração	Número de gerações utilizadas no AG, com o intuito de melhoria da rota.	300
N	Número de clientes de entrada para a faixa A, utilizado para fazer as simulações.	De 28 a 40
p_0	Probabilidade de aceitar a hipótese H_0	70%
p_1	Probabilidade de aceitar a hipótese H_1	30%

Fonte: próprio autor

Além dessas, ainda foi atribuído o limite de 8 horas para a jornada de trabalho da tripulação.

5.4. RESULTADOS

Após serem gerados os dados para análise, através da simulação, foi necessário realizar a implementação de rotinas para geração dos resultados de forma simplificada e objetiva, já que o

número de informações geradas é bastante extenso. Os valores que representavam tempo foram trabalhados na forma de minuto e as que representavam distância, foram trabalhadas em quilômetros.

Para fazer uma apresentação dos resultados, foram montadas algumas tabelas que serão contextualizadas, com o objetivo de apresentar o comportamento dos modelos simulados os quais são: a) modelo estático (ME); b) modelo dinâmico sem utilização do centro de massa (MDSCM); e o modelo dinâmico com utilização do centro de Massa (MDCCM).

Na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 são apresentadas de uma maneira um pouco mais simplificada os dados colhidos na simulação, com porcentagens de retorno e de transferência. Com isso, percebe-se que houve uma diferença significativa no percentual das frações de visitas não realizadas, principalmente se comparado os modelos dinâmicos com o estático conforme ilustrado no Fonte: Próprio Autor

Tabela 8- Resultados da simulação, configuração estática.

Clientes cadastrado nas zonas das faixas A, B e C	N. esperado de visitas nas 9 zonas/dia	N. de visitas efetivamente realizadas	Visitas não realizadas no dia (%)	Tempo média de ciclo (hs)
28-23-21	152,270	152,173	0,064	5,916
29-24-22	157,927	157,692	0,149	6,073
30-25-22	162,303	161,879	0,261	6,238
31-26-23	167,374	166,612	0,455	6,359
32-26-24	172,160	170,827	0,774	6,509
33-27-24	176,750	174,742	1,136	6,628
34-28-25	181,135	178,022	1,719	6,777
35-28-25	185,611	181,081	2,441	6,899
36-29-25	189,294	182,961	3,346	7,039
37-29-26	192,943	183,229	5,035	7,169
38-20-26	196,536	183,430	6,668	7,274
39-20-26	199,318	181,838	8,770	7,367
40-20-26	203,062	180,506	11,108	7,464

Fonte: Próprio Autor

Tabela 9- Resultados da simulação, configuração dinâmica não utilizando centro de massa.

Cliente cadastrado nas zonas da faixa A, B e C	N. esperado de visitas nas 9 zonas por dia	N. de visitas efetivamente realizadas²	Fração de visitas transferidas no dia (%)	Fração de visitas não realizadas no dia (%)	Tempo média de ciclo (horas)
28-23-21	152,270	152,1070	0,097	0,011	5,913
29-24-22	157,927	157,6260	0,174	0,018	6,071
30-25-22	162,303	161,7480	0,302	0,043	6,235
31-26-23	167,374	166,4100	0,516	0,076	6,357
32-26-24	172,160	170,5450	0,837	0,145	6,502
33-27-24	176,750	174,3570	1,241	0,273	6,619
34-28-25	181,135	177,5330	1,819	0,536	6,762
35-28-25	185,611	180,4700	2,567	0,935	6,882
36-29-25	189,294	182,2300	3,430	1,492	7,019
37-29-26	192,943	182,4540	5,094	2,406	7,141
38-20-26	196,536	182,6350	6,660	3,443	7,243
39-20-26	199,318	180,9520	8,902	4,771	7,330
40-20-26	203,062	179,3070	11,754	6,390	7,423

Fonte: Próprio Autor

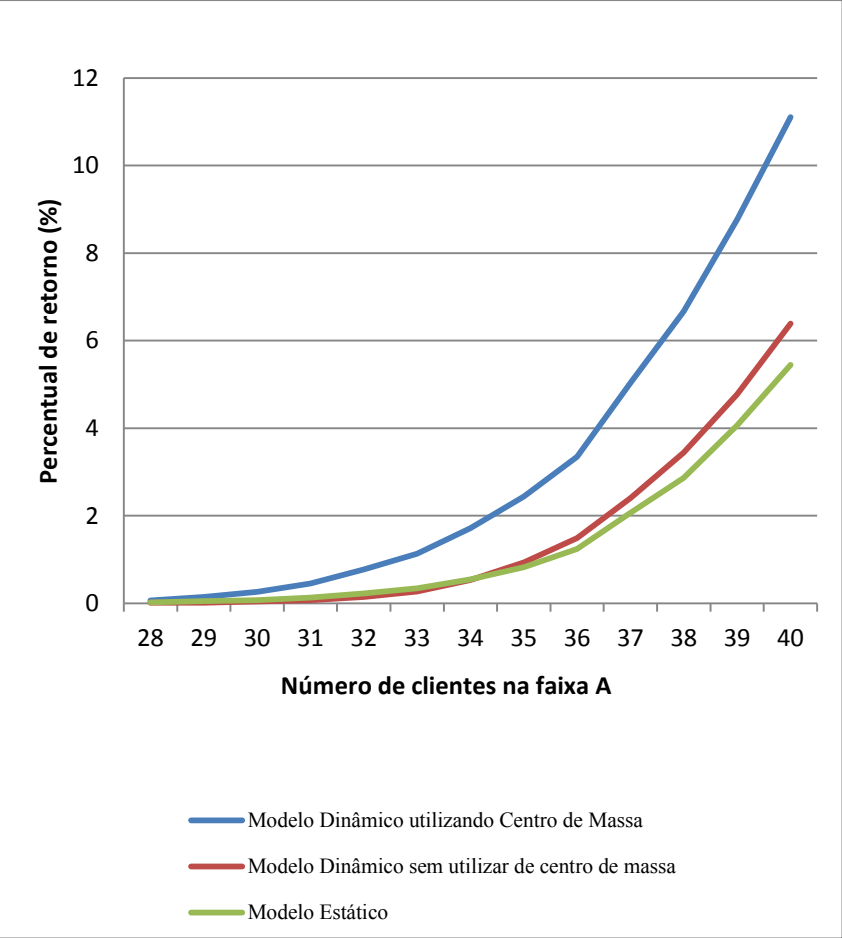
² Visitas realizadas pelo veículo regular.

Tabela 10- Resultados da simulação, configuração dinâmica utilizando centro de massa.

Cliente cadastrado nas zonas das faixas A, B e C	N. esperado de visitas nas 9 zonas por dia	N. de visitas efetivamente realizadas	Fração de visitas transferidas no dia (%)	Fração de visitas não realizadas no dia (%)	Tempo média de ciclo (horas)
28-23-21	152,270	152,185	0,033	0,023	5,916
29-24-22	157,927	157,726	0,077	0,050	6,071
30-25-22	162,303	161,961	0,139	0,072	6,240
31-26-23	167,374	166,721	0,264	0,132	6,360
32-26-24	172,160	170,982	0,471	0,227	6,508
33-27-24	176,750	174,928	0,726	0,347	6,632
34-28-25	181,135	178,328	1,105	0,549	6,777
35-28-25	185,611	181,428	1,697	0,823	6,899
36-29-25	189,294	183,364	2,412	1,243	7,040
37-29-26	192,943	183,855	3,798	2,072	7,172
38-20-26	196,536	184,354	5,168	2,866	7,277
39-20-26	199,318	182,804	7,204	4,068	7,371
40-20-26	203,062	181,606	9,560	5,444	7,476

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 1- Comparativo entre os percentuais de retorno dos modelos



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 11 apresenta a quantidade de tarefas não cumpridas pelo veículo auxiliar, sendo que a mesma é importante para se alcançar os valores exatos de atendimentos realizados, já que nas primeiras tabelas citadas o índice de retorno já está computando esses valores.

Tabela 11 - Quantidade de tarefas não cumpridas pelo veículo auxiliar

Cliente cadastrado nas zonas das faixas A, B e C	Retorno do veículo auxiliar não utilizando Centro de Massa	Distância média percorrida não utilizando centro de massa (km)	Retorno do veículo auxiliar utilizando Centro de Massa	Distância média percorrida utilizando centro de massa (km)
28-23-21	0	9,57	0	6,51
29-24-22	0,001	18,78	0	15,20
30-25-22	0,002	31,46	0	26,40
31-26-23	0,022	44,77	0,008	36,52
32-26-24	0,063	62,54	0,015	52,97
33-27-24	0,252	77,50	0,057	67,11
34-28-25	0,599	99,69	0,149	88,76
35-28-25	1,227	123,90	0,407	116,94
36-29-25	2,012	149,42	0,817	146,50
37-29-26	3,448	190,34	1,840	188,86
38-20-26	5,028	231,08	2,890	231,02
39-20-26	7,252	275,28	4,631	275,11
40-20-26	10,295	317,84	6,740	321,79

Fonte: Próprio Autor

Nas Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, se têm valores mais detalhados dos resultados, onde se podem utilizar estas informações para buscar novos dados. Diferentemente das outras tabelas até agora vistas, nestas o valor do custo de atendimento, ou seja, do tempo de ciclo de veículo está exposta em minutos, e não foram calculadas porcentagens de retornos e transferências, mas utilizaram-se os valores médios extraídos. Os dados dessas tabelas, também são agrupados pelo número de clientes cadastrados na faixa A.

Tabela 12- Resultado do modelo estático, agrupado por número de clientes da faixa A

Cliente cadastrado nas zonas das faixas A, B e C	Média de Clientes Seleccionados	Média de Clientes Atendimentos	Média de Clientes Retornados	Média do custo de Atendimento (min)
28-23-21	152,270	152,173	0,097	354,9494
29-24-22	157,927	157,692	0,235	364,3796
30-25-22	162,303	161,879	0,424	374,2923
31-26-23	167,374	166,612	0,762	381,5424
32-26-24	172,160	170,827	1,333	390,5505
33-27-24	176,750	174,742	2,008	397,6702
34-28-25	181,135	178,022	3,113	406,6055
35-28-25	185,611	181,081	4,530	413,9191
36-29-25	189,294	182,961	6,333	422,3323
37-29-26	192,943	183,229	9,714	430,1178
38-20-26	196,536	183,430	13,106	436,4112
39-20-26	199,318	181,838	17,480	442,0117
40-20-26	203,062	180,506	22,556	447,8266

Fonte: Próprio Autor

Tabela 13- Resultado do modelo dinâmico sem utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes da faixa A

Cliente cadastrado nas zonas das faixas A, B e C	N. esperado de visitas nas 9 zonas por dia	N. de visitas efetivamente realizadas	Média de Clientes Transferidos	Média de Clientes Retornados	Média do custo de Atendimento (min)
28-23-21	152,270	152,254	0,147	0,016	354,7703
29-24-22	157,927	157,899	0,274	0,028	364,2326
30-25-22	162,303	162,234	0,488	0,069	374,0808
31-26-23	167,374	167,246	0,858	0,128	381,3926
32-26-24	172,160	171,910	1,428	0,250	390,0970
33-27-24	176,750	176,268	2,163	0,482	397,1603
34-28-25	181,135	180,164	3,230	0,971	405,7467
35-28-25	185,611	183,876	4,633	1,735	412,9342
36-29-25	189,294	186,469	6,251	2,825	421,1375
37-29-26	192,943	188,301	9,295	4,642	428,4723
38-20-26	196,536	189,770	12,163	6,766	434,6083
39-20-26	199,318	189,809	16,109	9,509	439,7846
40-20-26	203,062	190,087	21,075	12,975	445,3946

Fonte: Próprio Autor

Tabela 14 - Resultado do modelo dinâmico com utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes da faixa A

Cliente cadastrado nas zonas das faixas A, B e C	N. esperado de visitas nas 9 zonas por dia	N. de visitas efetivamente realizadas	Média de Clientes Transferidos	Média de Clientes Retornados	Média do custo de Atendimento (min)
28-23-21	152,270	152,235	0,050	0,035	354,9667
29-24-22	157,927	157,848	0,122	0,079	364,2775
30-25-22	162,303	162,186	0,225	0,117	374,4061
31-26-23	167,374	167,153	0,440	0,221	381,5877
32-26-24	172,160	171,770	0,803	0,390	390,4707
33-27-24	176,750	176,137	1,266	0,613	397,9315
34-28-25	181,135	180,141	1,962	0,994	406,5943
35-28-25	185,611	184,083	3,062	1,528	413,9372
36-29-25	189,294	186,942	4,395	2,352	422,3870
37-29-26	192,943	188,945	6,930	3,998	430,3165
38-20-26	196,536	190,903	9,439	5,633	436,6260
39-20-26	199,318	191,209	13,036	8,109	442,2765
40-20-26	203,062	192,007	17,141	11,055	448,5714

Fonte: Próprio Autor

Para se conseguir uma melhor avaliação dos resultados formam montadas as Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17, onde os valores estão agrupados por número de clientes e por faixa. Com isso, estas tabelas tornam-se mais informativas, podendo se observar melhor o comportamento das simulações, onde pode-se constatar a diminuição de visitas por faixa, índices de transferência por faixa, índice de retornos por faixa e o tempo de ciclo dos atendimentos por faixa. Existem evidências que há interferência da distância dos distritos até o depósito, o que influencia muito no desempenho de atendimento do veículo. Fazendo uma análise mais detalhada, o número de clientes efetivamente visitados na faixa A é superior aos da faixa B e C, porém os valores médios do percurso não são proporcionais.

Tabela 15- Resultado do modelo dinâmico sem utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes e por faixa

N. de Cliente cadastrado	Faixa	Clientes cadastrados	N. esperado de visitas por dia	N. de visitas realizadas	Média de Clientes Transferidos	Média de Clientes do veíc. regular	Média do custo de Atendimento
28	A	28	58,595	58,589	0,003	0,003	349,8780
	B	23	49,179	49,162	0,010	0,007	354,7713
	C	21	44,496	44,434	0,037	0,025	360,2510
29	A	29	61,142	61,126	0,005	0,011	362,1523
	B	24	50,956	50,915	0,025	0,016	363,7363
	C	22	45,829	45,685	0,092	0,052	366,9440
30	A	30	62,910	62,893	0,007	0,010	372,4276
	B	25	52,292	52,195	0,052	0,045	373,7490
	C	22	47,101	46,873	0,166	0,062	377,0416
31	A	31	64,959	64,911	0,024	0,024	381,4196
	B	26	53,680	53,505	0,117	0,058	379,6070
	C	23	48,735	48,305	0,299	0,131	383,7366
32	A	32	67,311	67,154	0,087	0,070	392,8620
	B	26	55,175	54,811	0,240	0,124	388,4026
	C	24	49,674	49,017	0,476	0,181	390,1476
33	A	33	69,418	69,071	0,216	0,131	402,6923
	B	27	56,426	55,925	0,334	0,167	395,0450
	C	24	50,906	49,932	0,716	0,258	396,0573
34	A	34	71,553	70,903	0,414	0,236	413,3016
	B	28	57,942	57,063	0,590	0,289	404,4070
	C	25	51,640	50,362	0,958	0,320	402,0743
35	A	35	73,354	72,352	0,703	0,299	421,0513
	B	28	59,421	58,068	0,975	0,378	411,5670
	C	25	52,836	51,008	1,384	0,444	409,1933
36	A	36	75,530	73,703	1,288	0,539	431,7560
	B	29	60,282	58,487	1,310	0,485	419,2296
	C	25	53,482	51,174	1,797	0,511	416,1753
37	A	37	77,932	74,811	2,301	0,820	440,8513
	B	29	61,150	58,481	2,005	0,664	427,6030
	C	26	53,861	50,563	2,624	0,674	422,4953
38	A	38	79,734	75,455	3,309	0,970	446,2216
	B	30	62,100	58,636	2,633	0,831	434,2890
	C	26	54,702	50,263	3,497	0,942	429,3673
39	A	39	81,910	75,671	4,908	1,331	452,5996
	B	30	62,715	57,906	3,719	1,090	439,7113
	C	26	54,693	49,227	4,409	1,057	434,5186
40	A	40	83,963	75,608	6,734	1,621	458,7056
	B	30	63,959	57,485	5,105	1,369	446,9116
	C	26	55,140	48,513	5,302	1,325	440,0970

Fonte: Próprio Autor

Tabela 16- Resultado do modelo dinâmico com utilização do centro de massa, agrupado por número de clientes e por faixa

N. de Cliente cadastrado	Faixa	Clientes cadastrados	N. esperado de visitas por dia	N. de visitas realizadas	Média de Clientes Transferidos	Média de Clientes do veíc. regular	Média do custo de Atendimento
28	A	28	58,595	58,584	0,009	0,002	349,919
	B	23	49,179	49,146	0,029	0,004	354,429
	C	21	44,496	44,377	0,109	0,010	359,963
29	A	29	61,142	61,128	0,013	0,001	362,078
	B	24	50,956	50,905	0,048	0,003	363,942
	C	22	45,829	45,593	0,213	0,023	366,677
30	A	30	62,910	62,888	0,018	0,004	372,496
	B	25	52,292	52,161	0,108	0,023	373,454
	C	22	47,101	46,699	0,362	0,040	376,292
31	A	31	64,959	64,889	0,059	0,011	381,575
	B	26	53,680	53,410	0,240	0,030	379,345
	C	23	48,735	48,111	0,559	0,065	383,257
32	A	32	67,311	67,125	0,152	0,034	392,742
	B	26	55,175	54,687	0,426	0,062	388,064
	C	24	49,674	48,733	0,850	0,091	389,483
33	A	33	69,418	69,003	0,343	0,072	402,167
	B	27	56,426	55,765	0,587	0,074	394,442
	C	24	50,906	49,589	1,233	0,084	394,871
34	A	34	71,553	70,768	0,645	0,140	413,058
	B	28	57,942	56,808	1,027	0,107	403,268
	C	25	51,640	49,957	1,558	0,125	400,913
35	A	35	73,354	72,122	1,027	0,205	420,498
	B	28	59,421	57,752	1,521	0,148	410,547
	C	25	52,836	50,596	2,085	0,155	407,756
36	A	36	75,530	73,490	1,665	0,375	430,691
	B	29	60,282	58,016	2,042	0,224	417,774
	C	25	53,482	50,724	2,544	0,214	414,947
37	A	37	77,932	74,506	2,775	0,651	439,670
	B	29	61,150	58,012	2,872	0,266	425,779
	C	26	53,861	49,936	3,648	0,277	419,967
38	A	38	79,734	75,037	3,685	1,012	444,670
	B	30	62,100	57,990	3,726	0,384	432,229
	C	26	54,702	49,608	4,752	0,342	426,924
39	A	39	81,910	75,285	5,228	1,397	451,143
	B	30	62,715	57,175	5,060	0,480	436,926
	C	26	54,693	48,492	5,821	0,380	431,283
40	A	40	83,963	75,057	7,212	1,694	456,156
	B	30	63,959	56,601	6,780	0,578	443,289
	C	26	55,140	47,649	7,083	0,408	436,738

Fonte: Próprio Autor

Tabela 17- Resultado do modelo estático, agrupado por número de clientes e por faixa

N. de Cliente cadastrado	Faixa	Clientes cadastrados na zonas da Faixa	N. esperado de visitas nas 3 zonas por dia	N. de visitas efetivamente realizadas	Média de Clientes do veíc. regular	Média do custo de Atendimento
28	A	28	58,5950	58,5870	0,0080	350,0866
	B	23	49,1790	49,1600	0,0190	354,6893
	C	21	44,4960	44,4260	0,0700	360,0723
29	A	29	61,1420	61,1310	0,0110	362,2293
	B	24	50,9560	50,9080	0,0480	363,8673
	C	22	45,8290	45,6530	0,1760	367,0423
30	A	30	62,9100	62,8890	0,0210	372,4770
	B	25	52,2920	52,1850	0,1070	373,5913
	C	22	47,1010	46,8050	0,2960	376,8086
31	A	31	64,9590	64,9130	0,0460	381,4430
	B	26	53,6800	53,4770	0,2030	379,4536
	C	23	48,7350	48,2220	0,5130	383,7306
32	A	32	67,3110	67,1510	0,1600	393,1506
	B	26	55,1750	54,7540	0,4210	388,5246
	C	24	49,6740	48,9220	0,7520	389,9763
33	A	33	69,4180	69,0650	0,3530	402,4916
	B	27	56,4260	55,9040	0,5220	394,8486
	C	24	50,9060	49,7730	1,1330	395,6703
34	A	34	71,5530	70,8730	0,6800	413,6810
	B	28	57,9420	56,9560	0,9860	404,1986
	C	25	51,6400	50,1930	1,4470	401,9370
35	A	35	73,3540	72,2800	1,0740	421,4650
	B	28	59,4210	57,9570	1,4640	411,5263
	C	25	52,8360	50,8440	1,9920	408,7660
36	A	36	75,5300	73,7150	1,8150	432,0280
	B	29	60,2820	58,3130	1,9690	418,7720
	C	25	53,4820	50,9330	2,5490	416,1970
37	A	37	77,9320	74,6700	3,2620	441,1443
	B	29	61,1500	58,3190	2,8310	427,3120
	C	26	53,8610	50,2400	3,6210	421,8973
38	A	38	79,7340	75,1480	4,5860	446,3203
	B	30	62,1000	58,3260	3,7740	433,8186
	C	26	54,7020	49,9560	4,7460	429,0946
39	A	39	81,9100	75,4090	6,5010	452,9963
	B	30	62,7150	57,5700	5,1450	439,5186
	C	26	54,6930	48,8590	5,8340	433,5203
40	A	40	83,9630	75,2190	8,7440	458,4906
	B	30	63,9590	57,1510	6,8080	446,0393
	C	26	55,1400	48,1360	7,0040	438,9500

Fonte: Próprio Autor

Com as tabelas apresentadas e os valores analisados, os quais refletem os resultados das simulações dos três modelos adotados no trabalho, criou-se um modelo comparativo entre as mesmas para se poder chegar a uma conclusão embasada nos resultados. Para isso, criou-se uma situação hipotética do dia-a-dia, onde se trouxe informações utilizadas por empresas logísticas.

Assim, supondo-se que um operador logístico tenha assumido o compromisso com seus clientes que o serviço de coleta apresentará índice médio de tarefas não realizadas abaixo de 3%. Com isso, os resultados da configuração estática apontam a faixa de {35,28,25} para atender o acordado, apontando um número de 181 atendimento durante o dia efetivamente realizados, com índice de visitas não realizadas de 2,441%. Se forem verificados esses dados nas tabelas com a amostragem dinâmica, sem utilização do centro de massa, pode-se utilizar a faixa de {37,29,26}, apontando para o número de 188 clientes atendidos (realizados pelos veículos regulares e pelo veículo auxiliar), tendo um índice de retorno de 2,46%; entretanto se a comparação for realizada o modelo dinâmico utilizando o centro de massa a diferença aumenta ainda mais, podendo fazer utilização da faixa {38,30,26}, com a quantidade de 193 clientes, com índice de retorno de 2,866%.

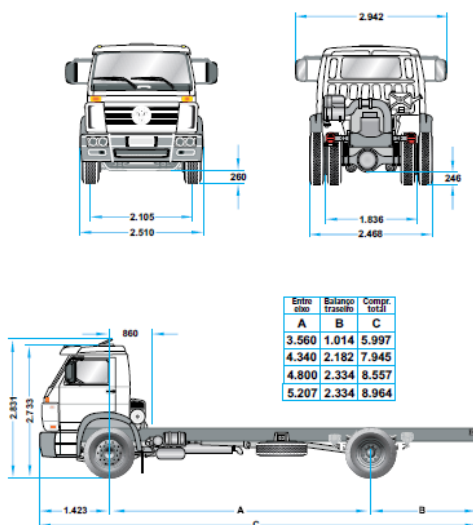
Caso o operador logístico queira utilizar a mesma faixa do modelo estático nos modelos dinâmicos teria uma diferença significativa no índice de retorno sendo o ME (Modelo Estático), teria 2,441% de retorno, com atendimento de 181 clientes. O MDSCM (Modelo Dinâmico sem utilização do centro de massa) teria um índice de retorno de 0,935%, com atendimento de 182 clientes e para finalizar o MDCCM (Modelo Dinâmico com utilização do centro de massa) se teria um índice de retorno de 0,832%, com atendimento de 184 clientes.

Visualizando por uma ótica não tão apurada, parece que esta diferença não é tão significativa, porém se for analisado que há 22 dias úteis durante o mês e estes índices são diários, então não teria sido atendido pelo ME cerca de 99,66 clientes, já pelo MDSCM teria cerca de 38,17 atendimento que não conseguiram ser realizados durante o período e no caso do MDCCM, 33,616 clientes teriam ficado sem receber atendimento durante o mês. A diferença entre os modelos totaliza aproximadamente 61 atendimentos.

Para estimar os custos das versões estática e dinâmica, configuração {35,28,25}, adotou-se um veículo médio VW 17.220

Worker (Figura 19), com custo fixo aproximado de R\$ 208,00 por dia e custo variável de R\$ 1,12 por quilômetro rodado. Em calculo realizado por Novaes, Burin, et al. (2010), chegou-se a custos de R\$ 15,08 por visita na situação estática e R\$ 16,35 por visita na situação dinâmica, dando diferença de 8,4% em favor do estático, como também que o custo de tarefas não cumpridas é o dobro do custo padrão, ou seja, R\$ 30,16 para o estático e R\$ 32,35 para o dinâmico.

Figura 19 - Caminhão VW 17.220 Worker



Fonte: (<http://www.pagan.com.br>, 2011)

Mesmo com um valor superior no custo dos serviços, adotando o método dinâmico, a vantagem que se tem com o alto nível de serviço, compensa essa perda de cerca de 8,4%. Conceitualmente, um alto nível de serviço é fundamental para um mercado competitivo, significando um grande salto em termos de qualidade, além de se ter um valor inigualável num ambiente altamente competitivo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi analisado um modelo dinâmico do processo de roteirização de veículos atendendo uma região urbana sujeita a condições de tráfego imprevistas. Com isso, parte das visitas programadas para os veículos que fazem o atendimento, e que não poderiam ser cumpridas por deficiência de tempo, são transferidas para um veículo auxiliar, reduzindo assim o não cumprimento das tarefas programadas para o dia.

Essa estratégia se aplica principalmente a problemas de coleta de produtos e courier, bem como serviços de instalação e manutenção diversos, sendo menos aplicável a serviços de entrega, que exigem transferência física.

No modelo proposto, foram adotadas duas formas de transferências de clientes para o veículo auxiliar. A primeira forma adotada foi transferir os últimos clientes do roteiro que não poderão ser atendidos. A segunda forma adotada foi transferir os clientes mais próximos de um centro de massa que não poderão ser visitados pelo veículo regular.

Para se realizar a validação do modelo proposto, foi utilizado um sistema de simulação. Este sistema foi implementado, utilizando dois modelos, o dinâmico, proposto por este trabalho, e o estático. Isto é de fundamental importância para o comparativo entre os modelos, pois as informações geradas são obtidas de um mesmo cenário. Além disso, foram realizadas 1000 simulações para o comparativo, buscando a convergência dos valores médios.

Com isso, após a obtenção dos resultados observa-se que a adoção do esquema dinâmico reduziu consideravelmente o índice de não cumprimento das tarefas. Neste modelo, a transferência dos clientes mais próximos de um centro de massa obteve melhores resultados.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Um aspecto importante a ser abordado no prosseguimento da pesquisa é a análise e avaliação de outros critérios de decisão adotados no modelo.

Outro ponto importante a ser pesquisado, é analisar outros algoritmos voltados à otimização da escolha das tarefas a serem removidas do roteiro, como também a implantação dessas tarefas no roteiro auxiliar.

Além disso, implementar um sistema de simulação com enfoque visual e não de simulação para se conseguir utilizar em testes reais, para analisar a execução prática do modelo. Com isso, serão necessários utilizações de computadores de bordos, um sistema de geo-referenciamento e um sistema de telecomunicação do veículo com o terminal.

Outra questão importante é considerar um número de veículos auxiliares maior do que a atual, que utiliza apenas um veículo. Essa configuração pode ser necessária para regiões mais amplas, ou para avaliar a utilização de veículos menores nas rotas auxiliares, principalmente quando a distribuição for limitada por peso ou por volume.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. **Logística Aplicada: Suprimento e Distribuição Física**. 3. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2000. ISBN 8521202687.

APPLEGATE, D. L. et al. **The Traveling Salesman Problem**. New Jersey: Princeton University Press, 2006. ISBN 978-0-691-12993-8.

ASSAD, A. A. Modeling and Implementation Issues in Vehicle Routing. In: GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A. **Vehicle Routing: Method and Studies**. Amsterdam: Elsevier Sciences Publisher, 1988. p. 7-45.

ASSIS, L. P. **Algoritmo para o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas**. Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Belo Horizonte, p. 86. 2007.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2006.

BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. Tradução de Hugo T Y Yoshizaki. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

BASSEVILLE, M.; NIKIFOROV, I. V. **Detection of Abrupt Changes - Theory and Application**. New Jersey: Englewood Cliffs, 1993. ISBN 0-13-126780-9.

BELFIORI, P. P. **Scatter Search para Problemas de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea, Janela de Tempo e Entrega Fracionadas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

BERTAGLIA, P. R. **Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento**. São Paulo: Saraiva, 2003. ISBN 9788502080959.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys**, 35, 2003. 268 - 308.

BODIN, L. D. et al. Routing and Sheduling of vehicles and crews: The state of the art. **Computers and Operations Research**, v. 10, n. 2, 1983.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B. Classification in vehicle routing and scheduling. **Networks**, v. 11, n. 22, p. 97-108, 1981. ISSN 1097-0037.

BOTELHO, L. G. **Um método para o planejamento operacional da distribuição: aplicação para casos com abastecimento de graneis líquidos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística Empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2001. 602 p. ISBN 8522428778.

BOWERSOX, D. J.; COOPER, M. B.; CLOSS, D. J. **Gestão Logística de Cadeia de Suprimentos**. [S.l.]: Bookman, 2006. ISBN 8536306084.

CHAVES, A. A. **Uma Meta-Heurística Híbrida com Busca por Agrupamentos Aplicada a Problemas de Otimização Combinatória**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - IMPE. [S.l.]. 2009.

CORDENONSI, A. Z. **Ambientes, Objetos e Dialogicidade: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

CORDENONSI, A. Z.; SANTOS, W. B. Resolução do Problema de Roteamento de Veículos Utilizando a Heurística de Savings. **Revista do Centro de Ciências da Economia e Informática**, Bagé-RS, v. 5, n. 7, p. 7-14, 2001. ISSN 1415-2061.

CORMEN, T. H. et al. **Algoritmos: Teoria e Prática**. Segunda Edição. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.

CORMEN, T. H. et al. **Algoritmos: Teoria e Prática**. Tradução de Vanderlei D de Souza. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002. 916 p. ISBN 85-352-0926-3.

CRAINIC, T. G.; LAPORTE, G. **Fleet Management and Logistics**. 1st. ed. Boston: Springer, 1998.

CRISTAL, M. D. O. **InterCOD - Uma Arquitetura Distribuida de Suporte a Centros de Otimização Cooperantes na Internet**. Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

CROES, G. A Method for Solving Travelling Salesman Problems. **Operations Research**, n. 6, p. 791-812, 1958.

CROES, G. A. A method for solving traveling salesman problems. **Operations Research**, v. 6, n. 6, p. 791-812, Nov. - Dec 1958. ISSN 0030364X.

CUNHA, C. B. D. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Revista Transportes**, v. 8, n. 2, p. 51-74, Novembro 2000.

CUNHA, C. B. D.; BONASSER, U. D. O.; ABRAHÃO, F. T. M. Experimentos Computacionais com Heurísticas de Melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante. **XVI Congresso da Anpet - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Natal, Outubro 2002.

DANTZIG, G. B.; FULKERSON, D. R.; JOHNSON, S. M. Solution of a Large Scale Traveling Salesman Problem. **Operation Research**, 1954. 393-410.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The Truck Dispatching Problem. **Management Science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, October 1959.

ENOMOTO, L. M. **Análise da Distribuição Física e Roteirização em um atacadista do sul de Minas Gerais**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG, p. 141. 2005.

ENOMOTO, L. M.; LIMA, R. D. S. Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista. **Revista Produção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 94-108, Janeiro/Abril 2007.

FILITO, D. Algoritmo Genético: uma visão exploratória. **Saber Acadêmico**, n. 6, 2008. ISSN 1980-5950.

FLEISCHMANN, B.; GNUTZMANN, S.; SANDVOß, E. Dynamic Vehicle Routing Based on Online Traffic Information. **Transportation Science**, 38, n. 6, November 2004. 420-433.

FONTES, F. F. D. C. **Algoritmo Memético com Infecção Viral: uma aplicação ao Problema do Caixeiro Viajante Assimétrico**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. [S.l.]. 2006.

FORTNOW, L. The Status of the P Versus NP Problem. **Communications of the ACM**, v. 52, n. 9, p. 78-86, September 2009.

FRAGA, M. C. P. **Uma metodologia híbrida: Colonia de Formigas - Busca Tabu - Reconexão por caminhos para resolução do problema de roteamento de veículo com janela de tempo**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.

GALVÃO, L. C. **Dimensionamento de Sistemas de Distribuição através do Diagrama Multiplicativo de Voranoi com pesos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis- SC, p. 162. 2003.

GHOSH, M. **Sequential estimation**. 1. ed. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1997. ISBN ISBN 0471812714.

GOEL, A. **Fleet Telematics: Real-Time Management and Planning of Commercial Vehicle Operations**. Nova York: Springer, 2008.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. R. **Otimização Combinatória e Programação Linear**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1989.

GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S.; WASIL, E. The Vehicle Routing Problem. New York: Springer, 2008.

GOODRICH, M. T.; TAMASSIA, R. **Algorithm Design Foundations, Analysis, and Internet Examples**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. ISBN 0-471-38365-1.

GUTIN, G.; PUNNEN, A. P. **The Traveling Salesman Problem and Its Variations**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 1-4020-0664-0.

HERRERA, B. A. L. D. M. **Combinação de Enxame de Partículas com Inspiração Quântica e Método Lin-Kernighan-Helsgaun aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2007.

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems**. [S.l.]: University of Michigan Press in Ann Arbor, 1975. ISBN 0472084607.

JOHNSON, D. S.; MCGEOCH, L. A. The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization. **Local Search in Combinatorial Optimization**, 2003.

LAI, T. L. Sequential analysis: some classical problems and new challenges. **Statistica Sinica**, v. 11, p. 303-408, 2001.

LAPORTE, G. The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. **European Journal of Operations Research**, v. 59, p. 345-358, 1992.

LAPORTE, G. et al. Classical and Modern Heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 7, p. 285-300, September 2000.

LARSEN, A. **The Dynamic Vehicle Routing Problem**. Technical University of Denmark. Lyngby, Dinamarca. 2001.

LARSEN, A.; SALOMON, M. M.; MADSEN, O. B. G. Classification of Dynamic Vehicle Routing Systems. In: ZEIMPEKIS, V., et al. **Dynamic Fleet Management**. Nova York: Springer, 2007. Cap. 2.

LARSON, R. C.; ODONI, A. R. **Urban Operations Research**. 2. ed. [S.l.]: Dynamic Ideas, 2007. ISBN 0975914634.

LAWLER, E. L. et al. **The Traveling Salesman Problem: a guided tour of combinatorial optimization**. [S.l.]: [s.n.], 2001.

LAZARIN, D. F. **Roteamento Dinâmico de Veículos: Análise do Impacto em Atividades de Prestação de Serviço**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2008.

LIMA, I. X. A. **Igoritmos para problemas de roteamento de veículos com entrega e coleta**. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2009.

LIN, S. Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. **Bell System Tech**, 18 August 1965. 2245-2269.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An Effective Heuristic Algorithm for the Travelling Salesman Problem. **Operations Research**, n. 21, p. 498-516, 1973.

MASSUTI, T. A. S.; CASTRO, L. N. D. Uma Rede Neuro-Imune aplicada ao Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes. **Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN)**, v. 5, n. 2, p. 81-98, 2007. ISSN 1676-2789.

MELO, A. C. D. S.; FILHO, V. J. M. F. Sistema de roteirização. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, July 2001. ISSN 0101-7438.

MIURA, M. **Modelagem Heurística no Problema de Distribuição de Cargas Fracionadas de Cimento**. Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo. 2008.

NASCIMENTO, D. B. et al. Análise Comparativa de Algoritmos Heurísticos para Resolução do Problema do Caixeiro-Viajante em Grafos Não Clusterizados. **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Florianópolis, 03 a 05 Novembro 2004.

NETO, A. F.; LIMA, R. D. S. Roteirização de veículos de uma rede atacadista com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas (SIG). **Anais do XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Porto Alegre, 29 a 01 Outubro/Novembro 2005.

NETO, A. J. D. S.; BECCENERI, J. C. Técnicas de Inteligência Computacional Inspiradas na Natureza: Aplicações em Problemas Inversos em Transferência Radiativa. **Notas em Matemática Aplicada**, 41, 2009. 122.

NETO, J. S. D. S. **Aplicação das Técnicas Path-Relinking e Vocabulary Building na Melhoria da Performance do Algoritmo Memético para o Problema do Caixeiro Viajante Assimétrico.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2009.

NEWELL, G. F.; DAGANZO, C. F. Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours - (Ii) A Ring-Radial Network. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 44, n. 5, p. 345-363, 1986. ISSN ISSN: 0191-2615.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

NOVAES, A. G. et al. Roteirização Dinâmica de Veículos usando Simulação e Algoritmo Genético. **XXIV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Salvador-BA, 29-03 Novembro-Dezembro 2010.

NOVAES, A. G. N. **Um Processo para Otimização de Testes Sequenciais de Hipóteses Simples.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1968.

NOVAES, A. G. N.; CURI, J. E. S. D.; GRACIOLLI, O. D. A continuous approach to the design of physical distribution systems. **Computers & Operations Research**, v. 27, n. 9, p. 877-893 , August 2000. ISSN ISSN: 0305-0548.

NOVAES, A. G.; BURIN, P. J. Um Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos. **XXIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Vitória, 2009.

NOVAES, A. G.; FRAZZON, E. M.; BURIN, P. J. Dynamic Vehicle Routing in Over Congested Urban Areas. **Annals of the II LogDynamics International Conference (LDIC)**, Bremen - Germany, 17-21 August 2009. 103-112.

OLIVEIRA, M. J. D. S. **Otimização de Circuitos de Recolha de Lixos Domésticos em Zonas Urbanas.** Universidade do Porto. [S.l.]. 2008.

OSMAN, I. H.; LAPORTE, G. Metaheuristics: A bibliography. **Annals of Operations Research**, 63, n. 5, October 1996.

PARRAGH, S. N.; DOERNER, K. F.; HATL, R. F. A survey on pickup and delivery problems part I: Transportation between customers and depot. **Journal für Betriebswirtschaft**, 58, April 2008A. 21-51.

PARRAGH, S. N.; DOERNER, K. F.; HATL, R. F. A survey on pickup and delivery problems part II: Transportation between customers and depot. **Journal für Betriebswirtschaft**, 58, n. 2, June 2008B. 81-117.

PAULA, M. Â. A. F. D. **Estudo de Roteirização de Veículos Empregando o Transcad - Contribuição para a Distribuição Urbana de Carga**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2009.

PRESTES, A. N. **Uma Análise Experimental de Abordagens Heurísticas Aplicadas ao Problema do Caixeiro Viajante**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 84. 2006.

RADUAN, A. C. **Roteirização Parcialmente Dinâmica Aplicada a Serviços de Campo**. EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 121. 2009.

RIBEIRO, G. M.; LORENA, L. A. N. Roteamento de veículos dinâmico usando algoritmos genéticos. **Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**, Recife - PE, 2005.

RODRIGUES, M. A. P. **Problema do Caixeiro Viajante - Um Algoritmo para Resolução de Problemas de Grande Porte Baseado em Busca Local Dirigida**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2000.

RONEN, D. Perspectives on Practical Aspects of Truck Routing as Scheduling. **European Journal of Operational Research**, 35, 1988. 137-145.

ROSA, B. F. **Problema de Sequenciamento em uma Máquina com Penalidades por Antecipação e Atraso da Produção**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

SAUER, J. G. **Abordagem de Evolução Diferencial Híbrida com Busca Local Aplicada**. Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2007.

SILVA, A. L. **A adoção de tecnologia de informação em canais de distribuição**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

SILVA, R. C. O. D. **Avaliação da implementação de softwares de roteirização de veículos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2007.

SINAY, M. C. F. et al. **Distribuição de Carga Urbana: componentes, restrições e tendências**. Rio de Janeiro. 2004.

SOSA, N. G. M.; GALVÃO, R. D.; GANDELMAN, D. A. Algoritmo de Busca Dispersa Aplicado ao Problema Clássico de Roteamento de Veículos. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 2, p. 293-310, Maio 2007. ISSN 0101-7438 / ISSN 1678-5142.

SOUZA, F. S.; GUARDIA, L. E. T. Aplicação do Modelo de Roteamento e Programação de Veículos à Distribuição de Fardamento destinada aos Postos de Vendas e de Encomendas na Marinha do Brasil. **X Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha**, Rio de Janeiro, 08 e 09 Novembro 2007.

SPINDLER, M. **Uma Proposta de Solução para Problemas de Horário Educacional utilizando Busca Dispersa e Reconexão por Caminhos**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2010.

STENGER, E. A.; DEIMLING, M. F. Definição de logística sob a ótica dos dirigentes de empresas transportadoras de carga e operadores logísticos do Oeste Catarinense. **III SEGET - Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, Resende, 2006.

TEMPONI, C. C. **Uma Proposta de Resolução do Problema de Corte Bidimensional via Abordagem Metaheurística**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

TENKLEY, N. L. **Order Picking: Modelos de Algoritmos de Roteamento**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

TOSCANI, L. V.; VELOSO, P. A. S. **Complexidade de Algoritmos: Análise, Projetos e Métodos**. 1ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, v. 13, 2002.

VALENTE, A. M.; PASSAGLIA, E.; NOVAES, A. G. **Gerenciamento de Transporte e Cargas**. São Paulo: Cengage Learning, 2003. ISBN 8522100519.

VIEIRA, L. E. **Algoritmo Evolutivo para o Problema do Caixeiro Viajante com Demandas Heterogêneas**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2006.

WALD, A. **Sequential analysis**. New York: Wiley, 1947.

XU, H. et al. Solving a practical pickup and delivery problem. **Transportation Science**, v. 37, n. 3, p. 347-364, August 2003. ISSN 0041-1655.

ANEXO A - MODELAGEM DE DADOS

ResultadoDinamicoCM

CodResultado INT(10)

AreaX INT(10)

AreaY INT(10)

ZonaA INT(10)

ZonaB INT(10)

ZonaC INT(10)

NumRodada INT(10)

Velocidade INT(10)

NumCliente INT(10)

NumClienteZona INT(10)

NumClienteSelecioneado INT(10)

NumAtendidoCM INT(10)

NumTransferidoCM INT(10)

NumRetornoCM INT(10)

TempoTransferenciaCM DOUBLE

TempoRetornoCM DOUBLE

CustoTransferenciaCM DOUBLE

CustoAtendidosCM DOUBLE

DistanciaAtendidosCM DOUBLE

DistanciaTransferencia DOUBLE

DistanciaTransferenciaCM DOUBLE

Indexes

PRIMARY

NumCliente

NumRodada

Consulta_I

ResultadoDinamico

CodResultado INT(10)

AreaX INT(10)

AreaY INT(10)

ZonaA INT(10)

ZonaB INT(10)

ZonaC INT(10)

NumRodada INT(10)

Velocidade INT(10)

NumCliente INT(10)

NumClienteZona INT(10)

NumClienteSelecioneado INT(10)

NumAtendido INT(10)

NumTransferido INT(10)

NumRetorno INT(10)

TempoTransferencia DOUBLE

TempoRetorno DOUBLE

CustoTransferencia DOUBLE

CustoAtendidos DOUBLE

DistanciaAtendidos DOUBLE

DistanciaTransferencia DOUBLE

Indexes

PRIMARY

NumCliente

NumRodada

AreaX

AreaY

Consulta_I

Genetico

CodGenetico INT(10)

NumClientes INT(10)

NumRodada INT(10)

NumAtendidos INT(10)

NumRetornos INT(10)

CustoTotal DOUBLE

PontoVRota TEXT

PontoVRota TEXT

CentroMassa TINYINT(1)

Indexes

PRIMARY

NumClientes

NumRodada

Consulta_I

ResultadoEstatico

CodResultado INT(10)

AreaX INT(10)

AreaY INT(10)

ZonaA INT(10)

ZonaB INT(10)

ZonaC INT(10)

NumRodada INT(10)

Velocidade INT(10)

NumCliente INT(10)

NumClienteZona INT(10)

NumClienteSelecioneado INT(10)

NumAtendido INT(10)

NumTransferido INT(10)

NumAtendidoCm INT(10)

NumRetorno INT(10)

TempoTransferencia DOUBLE

TempoRetorno DOUBLE

CustoTransferencia DOUBLE

CustoTransferenciaCM DOUBLE

CustoAtendidos DOUBLE

DistanciaAtendidos DOUBLE

DistanciaTransferencia DOUBLE

Indexes

PRIMARY

AreaY

NumRodada

NumRodada1

NumCliente1

AreaX

Consulta_I